

NARA CRISTINA DE LIMA SILVA

**MOBILIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE SOLUTOS DE SORO DE
LEITE EM COLUNAS DE SOLO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2009

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

S586m
2009

Silva, Nara Cristina de Lima, 1980-
Mobilidade e distribuição de solutos de soro de leite em
colunas de solo / Nara Cristina de Lima Silva. – Viçosa,
MG, 2009.
xi, 56f. : il (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Hugo Alberto Ruiz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 42-47

1. Solos - Efeito do soro de leite. 2. Solos - Lixiviação.
3. Solos - Aspectos químicos. 4. Solos - Aspectos
biológicos. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.41

NARA CRISTINA DE LIMA SILVA

**MOBILIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE SOLUTOS DE SORO
DE LEITE EM COLUNAS DE SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de outubro de 2009.



Prof. Walter Antônio P. Abrahão
(Coorientador)



Prof. Víctor Hugo Álvarez V.
(Coorientador)



Prof. Genelício Crusoé Rocha



Prof. Antonio Teixeira de Matos



Prof. Hugo Alberto Ruiz
(Orientador)

Aos meus queridos pais, Osmar Benevenuto e Maria Aparecida, e a todos os meus familiares, sempre presentes nas minhas buscas e conquistas.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria e presença constante na minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade concedida para a realização deste curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Laticínio Cottalac Indústria e Comércio Ltda, pelo apoio concedido a este trabalho.

Ao Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, em especial ao Ricardo Marques, que gentilmente cedeu informações importantes a que enriqueceram este trabalho.

Ao professor e orientador Hugo Alberto Ruiz, por tudo o que fez por mim durante a realização desse trabalho, por nunca ter me deixado nada faltar durante o curso e, claro pelos conselhos sempre sábios e pela amizade.

Aos professores Víctor Hugo Alvarez V. e Walter Antônio P. Abrahão, pela orientação sempre solícita durante a realização deste trabalho.

Ao professor Genelício Crusoé, pelas críticas e sugestões.

Ao professor Ivo Ribeiro e sua bolsista Laisa Pimentel, pelo auxílio indispensável no ensaio de evolução de C-CO₂.

Ao bolsista de iniciação científica Luiz Rogério, pela valiosa contribuição durante o experimento, e à querida estagiária Paula Oliveira, presente de Deus na minha vida, pela dedicação, pelo carinho e, principalmente, pela amizade.

Aos funcionários do Laboratório de Física do Solo: Cláudio Brustoline, Fábio e Benedito por tudo que fizeram por mim, pela paciência, pelo convívio agradável e pela compreensão durante a realização do experimento. Aos demais laboratoristas: Carlos Fonseca, Jorge Orlando, Cardoso, Beto, João Milagres, Brás e Zélia, pelas pequenas e grandes coisas que fizeram por mim.

A Luciana e Cláudia, secretárias do Programa de Pós-Graduação, pelo atendimento sempre solícito.

A todos os colegas do curso de pós-graduação, em especial ao Enrique Caballero e Joaquin Pena, pelas dicas e pelos conselhos.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola, em especial ao professor Antonio Teixeira de Matos, pela amizade e pela valiosa contribuição na minha vida acadêmica e profissional.

A todas as companheiras de república com quem tive o prazer de conviver durante quase nove anos vividos em Viçosa, em especial na fase de mestrado: Rose, Helaine e Juliana, pelo convívio agradável e harmonioso.

Às queridas amigas de Viçosa, Heloisa Sedyama, Simone Bhering e Juracy Fernandes pelo carinho, pelo apoio e por todos os momentos alegres vividos juntas.

Aos moradores da república “Boca do Leão”: Sady Jr., Clever Alves, Awodum Moses e Adebayo Jonathan, pelo carinho, pelo acolhimento e pelas risadas.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

NARA CRISTINA DE LIMA SILVA, filha de Osmar Benevenuto Silva e Maira Aparecida de Lima Silva, nasceu em 24 de outubro de 1980, em Lavras, Estado de Minas Gerais.

Em abril de 2001, ingressou no curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG, graduando-se em outubro de 2006.

Em agosto de 2007, iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em 27 de outubro de 2009.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. A Indústria Láctea Brasileira.....	3
2.2. Caracterização do Soro de Leite.....	4
2.3. O soro de Leite e a Alimentação Humana	5
2.4. O soro de Leite e a Alimentação Animal	7
2.5. Poder Poluente e Possibilidades de Tratamento do Soro	7
2.6. Uso de Águas Residuárias no Solo	8
2.6.1. Uso do Soro de Leite no Solo	9
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1. Mobilidade e Distribuição de Solutos	18
4.2. Evolução de C-CO ₂	31
4.3. Caracterização dos Percolados	34

5. CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS	42
APÊNDICE	48

RESUMO

SILVA, Nara Cristina de Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2009. **Mobilidade e distribuição de solutos de soro de leite em colunas de solo**. Orientador: Hugo Alberto Ruiz. Coorientadores: Walter Antônio Pereira Abrahão e Víctor Hugo Alvarez V.

Neste ensaio, conduzido em laboratório, objetivou-se determinar alterações químicas e biológicas e a mobilidade e distribuição de solutos no solo após aplicação fracionada de soro de leite, assim como a caracterização dos percolados recolhidos após cada aplicação. Os tratamentos corresponderam a um fatorial 2 x 2, sendo um Latossolo Vermelho - Amarelo distrófico típico (LVAd) e um Cambissolo Flúvico Tb distrófico (CYbd), coletados em duas profundidades: 0–20 e 20–40 cm. As áreas de coleta foram selecionadas entre aquelas com possibilidade de receber aplicações de soro de leite. Cada unidade experimental foi constituída de 10 anéis de PVC, com 6,6 cm de diâmetro interno e 7 cm de altura. As colunas foram dispostas em um delineamento experimental em blocos casualizados, com cinco repetições. Foram realizadas quatro aplicações de soro de leite, correspondentes a 0,2 volume de poros de solo, a cada intervalo de seis dias. Após 24 h de cada aplicação, o percolado foi recolhido e o volume determinado. As determinações realizadas nos percolados compreenderam pH, condutividade elétrica

(CE), demanda química de oxigênio (DQO), teores de N total, N-NH_4^+ , N-NO_3^- , Na, K, Ca e Mg. Ao final do período de aplicação, as colunas foram desmontadas e o solo contido nos 5 cm centrais de cada anel foi analisado. As análises compreenderam: pH em água, condutividade elétrica (1:5), N total, N-NH_4^+ , N-NO_3^- , Na, K, Ca, Mg e Al trocáveis e P disponível. Como complemento, foi realizado ensaio da evolução do C-CO_2 nas amostras dos dois anéis localizados nas extremidades de cada coluna. A aplicação de soro de leite no solo como destino final para esse resíduo é uma alternativa viável do ponto de vista ambiental, desde que seja feito um correto manejo a fim de evitar problemas de selamento superficial, salinização e lixiviação de elementos indesejáveis. As elevadas concentrações eletrolíticas do soro de leite provocaram aumento generalizado da condutividade elétrica, sugerindo tendência à salinização do solo. Houve incremento maior do nitrogênio assimilável (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) no solo em decorrência dos processos de mineralização. Elevadas concentrações de K, Na e Ca causaram deslocamento de Mg do complexo de troca e acentuada lixiviação desse nutriente.

ABSTRACT

SILVA, Nara Cristina de Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2009. **Mobility and distribution of milk whey solutes in soil columns.** Advisor: Hugo Alberto Ruiz. Co-advisors: Walter Antônio Pereira Abrahão and Víctor Hugo Alvarez V.

The present work was conducted in a laboratory and aimed to determine the chemical and biological alterations and mobility and distribution of solutes in the soil after the split application of milk whey, and to characterize the percolates collected after each application. A 2 x 2 factorial design was used in the treatments. A typical Xanthic Haplustox (Red-Yellow Latosol) and a Fluventic Dystrustept (Fluvis Cambisol), collected at the depths of 0–20 cm and 20–40 cm, were used. The collecting areas were selected among those which could receive applications of milk whey. Each experimental unit was made of ten PVC rings, with 6,6 cm of internal diameter and 7 cm of height. The columns were arranged in a casualized block experimental design, with five replications. Four applications of milk whey were performed, corresponding to a 0.2 volume of soil pores at each six-day interval. Twenty-four hours after each application, the leachate was removed and the volume was determined. The determinations carried out in the leachates comprised pH, electrical conductivity (EC), chemical oxygen

demand (COD), contents of total N, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, Na, K, Ca and Mg. At the end of the period of application, the columns were disassembled and the soil contained in the central 5 cm of each ring was analyzed. The analyses comprised: pH in water, electrical conductivity (1:5), total N, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, Na, K, Ca, Mg, exchangeable Al and available P. It was performed a complementary essay of the C-CO₂ evolution in the samples of the two rings located in the extremities of each column. The application of milk whey in the soil as the final destination for this residue is an environmentally viable alternative, provided that a correct handling is observed to avoid problems of superficial sealing, salinization and leaching of undesirable elements. The high milk whey electrolyte concentrations caused a generalized increase in the electrical conductivity, suggesting a tendency to soil salinization. There was a higher increment of the assimilable nitrogen (N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻) in the soil due to the mineralization processes. High concentrations of K, Na and Ca generated the displacement of Mg from the exchange complex and the sharp leaching of this nutrient.

1. INTRODUÇÃO

Entre os setores da indústria alimentícia, o segmento de laticínios é um dos mais importantes do Brasil. Aproximadamente 35 % da produção de leite no País é destinada à fabricação de queijos, principalmente mussarela, prato e minas frescal (Farro & Viotto, 2003). Nesse tipo de indústria, o soro de leite é o principal subproduto. Esse resíduo destaca-se pelo grande volume gerado (cerca de 9 L kg^{-1} de queijo fabricado) e pelas suas características de qualidade, que permitem diversas possibilidades de uso.

O soro de leite pode ser utilizado diretamente na alimentação animal ou na fabricação de bebidas lácteas e na produção de ricota. O beneficiamento seguido dos diversos processos para a fabricação de derivados (centrifugação, concentração, secagem, fracionamento, fermentação e outros) permite que esse produto tenha diversos usos (Maganha, 2006). No entanto, a falta de técnicas acessíveis impede seu total aproveitamento na alimentação humana.

A presença de proteínas, lipídeos, sais minerais e lactose confere ao soro elevado poder poluente, quando disposto sem critérios no meio ambiente. O tratamento desse efluente geralmente é dificultado devido à elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), proporcionada principalmente pela presença de lactose, e ao grande volume produzido diariamente (Khamrui et al., 2001). Assim, na maioria das vezes, o destino

dado a esse efluente é o descarte nos cursos d'água. Diante do exposto, tornam-se necessários estudos que viabilizem novas formas de aproveitamento do soro de leite. A disposição no solo surge como alternativa quando da inviabilidade do uso desse subproduto na alimentação humana ou animal.

O objetivo deste trabalho foi determinar alterações químicas e biológicas e a mobilidade e distribuição de solutos após aplicação fracionada de soro de leite em colunas preenchidas com amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVAd) e de um Cambissolo Flúvico Tb distrófico (CYbd), retiradas em duas profundidades. Além disso, objetivou-se caracterizar o percolado proveniente dessa aplicação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A Indústria Láctea Brasileira

O Brasil é, atualmente, o sexto produtor mundial de leite, sendo o segmento de laticínios o mais expressivo da indústria de alimentos brasileira. A estimativa é de que, em 2009, o consumo de leite pelas indústrias lácteas atinja 18,5 GL (MAPA, 2009a).

O maior número dessas indústrias localiza-se nos Estados onde há maior produção de leite e consumo de produtos lácteos (INDI, 2003). Historicamente, a produção leiteira de Minas Gerais vem se destacando das demais unidades federativas; em 2007, o Estado foi responsável por 30,3 % do total da produção nacional (IBGE, 2008).

Considerando apenas estabelecimentos lácteos com Selo de Inspeção Federal (SIF), Minas Gerais possui 36,2 % desses estabelecimentos; São Paulo, 10,69 %; Paraná, 9,42 %; Goiás, 7,08 %; Rio Grande do Sul, 7,28 % e Santa Catarina, 6,18 %. Nos referidos Estados, líderes na produção nacional de leite e derivados, é relevante destacar a prevalência das micro e pequenas empresas lácteas. Em Minas Gerais, por exemplo, 36,21 % delas processam até 5 kL d⁻¹ de leite; 27,22 %, de 5 a 10 kL d⁻¹ de leite; 14,52 % de 10 a 20 kL d⁻¹; 13,23 % processam de 20 a 50 kL d⁻¹ e somente 8,22 % processam mais de 50 kL d⁻¹ (MAPA, 2009b).

Em Minas Gerais, a Região Sul do Estado se destaca com o maior número de estabelecimentos lácteos. A Zona da Mata ocupa a segunda posição, seguida das regiões Central, Triângulo Mineiro, Rio Doce, Alto Paranaíba e Centro Oeste de Minas (INDI, 2003).

Quanto maior o número de laticínios em operação, maior será também a quantidade de subprodutos gerados. As indústrias lácteas geram três subprodutos na forma de efluente: o soro de leite, o leiteiro e o leite ácido. Desses, o soro de leite é o de maior importância, devido ao volume produzido, ao amplo espectro de possibilidades de reutilização e, principalmente, devido ao seu poder poluente (Martins et al., 2000).

2.2. Caracterização do Soro de Leite

O soro de leite é um produto lácteo líquido obtido durante o processamento do queijo, da caseína ou produtos similares, mediante a separação da coalhada, após coagulação do leite e, ou, produtos dele derivados. Nesse caso, a coagulação é feita principalmente por enzimas do tipo coalho (FAO & WHO, 1995).

O soro representa aproximadamente 80 a 90 % do volume de leite e contém 55 % dos seus nutrientes, e o teor de água varia de 91 a 95 % (Silva, 2006). O extrato seco é, em média, de 6,9 %, dos quais 5 % correspondem a lactose; 0,9 %, a proteínas; 0,3 %, a lipídeos; e 0,1 % a ácido láctico, além de outros nutrientes presentes em menores concentrações (Santos, 2001).

A composição média e as características químicas do soro fresco dependem do processo utilizado na fabricação do queijo e são mostradas no quadro 1 (Robbins & Lehrs, 1998).

Quadro 1. Composição média do soro de leite

Componente	Valor
Água (g L ⁻¹)	920
Sólidos totais (g L ⁻¹)	80
pH	3,8 - 4,6
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	7 - 12
N total (mg kg ⁻¹) ^{1/}	900 - 2200
P total (mg kg ⁻¹) ^{1/}	300 - 600
Ca (mg kg ⁻¹) ^{1/}	430 - 1100
Mg (mg kg ⁻¹) ^{1/}	90 - 120
Na (mg kg ⁻¹) ^{1/}	360 - 1900
K (mg kg ⁻¹) ^{1/}	1000 - 1400

^{1/} Valor na matéria seca. Fonte: Robbins & Lehrs, (1998).

2.3. O Soro de Leite e a Alimentação Humana

A recuperação das substâncias alimentares do soro de leite para o consumo humano depende da disponibilidade de técnicas apropriadas e do emprego de processos economicamente viáveis (Kinsella, 1984).

O aproveitamento direto do soro inclui o seu uso, principalmente, na fabricação de bebidas lácteas e ricota. No caso da fabricação de bebidas lácteas, a Instrução Normativa número 16 (MAPA, 2005) aprova o Regulamento Técnico da Identidade e Qualidade de bebidas lácteas. O referido regulamento estabelece que a bebida láctea deve conter no mínimo 51 % (massa/massa) de leite, limitando, portanto, a quantidade de soro a ser aproveitada para esse fim.

A instalação de uma planta de recuperação de partes do soro permite que esse resíduo seja concentrado, transformando-o em soro em pó, ou desmineralizado, para obtenção de proteínas do soro, lactose e outros produtos. Também pode ser ultrafiltrado, para obtenção de concentrados proteicos. Na produção de soro em pó, bem como na separação de proteínas e lactose com posterior secagem, é desejável operar grande volume de soro de leite, o que exige investimentos consideráveis (Primo, 2001).

Na obtenção de concentrados proteicos por ultrafiltração do soro de leite através de membranas, são retidas apenas as proteínas e os lipídeos, enriquecendo o concentrado. No entanto, essa técnica ainda não está difundida, principalmente entre os pequenos e médios laticínios, em razão dos elevados custos.

Diante do exposto, percebe-se que somente os grandes estabelecimentos lácteos dispõem de técnicas adequadas para recuperar os diversos componentes do soro. Assim, os pequenos e médios laticínios, que são maioria no País, sobretudo em Minas Gerais, têm como solução a venda desse subproduto para as grandes unidades processadoras ou efetuar a sua disposição final.

A Instrução Normativa número 1 (MAPA, 1985), que visa normatizar os procedimentos de obtenção e de industrialização do soro para uso na alimentação humana, exige que ele seja estocado nos laticínios em equipamentos de aço inoxidável e resfriado em temperatura inferior a 5 °C até, no máximo, o dia seguinte à sua obtenção. Para o transporte, é exigido carro-tanque isotérmico, sendo vetada a mistura de soros oriundos de mais de um estabelecimento, a não ser que o tanque seja compartimentado.

Com base no exposto, percebe-se a dificuldade, principalmente dos pequenos e médios laticínios, em destinar todo o soro de leite para uso na alimentação humana. Isso acontece em razão dos custos com resfriamento e também devido à deficiente malha viária que liga os laticínios até as unidades secadoras e processadoras de soro. Ainda, deve-se levar em conta que, na maioria das vezes, o preço pago pelo litro de soro é muito baixo, não compensando sua venda por muitos estabelecimentos.

Embora haja disponibilidade, o soro de leite é um dos produtos mais importados da cadeia láctea brasileira. Somente no ano de 2008 o Brasil importou, sobretudo da Argentina, 38,4 kt de soro em pó, o que representou 49 % do total dos produtos lácteos importados (Zoccal & Fonseca, 2009).

2.4. O Soro de Leite e a Alimentação Animal

Estudos indicam potencial de utilização do soro de leite na alimentação de suínos, principalmente em razão de sua alta palatabilidade e valor nutritivo. No entanto, trabalhos experimentais indicam que o soro pode substituir até, no máximo, 20 % da dieta de suínos em fase de crescimento e terminação, sem prejuízo no desempenho e nas características de carcaça (Bertol et al., 1993).

Quanto à alimentação de bovinos, recomenda-se que o soro não substitua o leite na fase de aleitamento do animal e que seja fornecido de forma limitada aos animais adultos. Alguns problemas decorrentes do fornecimento de soro a bovinos são comuns, como a queda da palatabilidade após 2 d de armazenamento, devido ao azedamento. Diarreias e timpanismo podem ocorrer se os animais consumirem grande quantidade de soro em curto espaço de tempo ou se não estiverem consumindo quantidade adequada de volumoso (Lizieire & Campos, 2001).

2.5. Poder Poluente e Possibilidades de Tratamento do Soro de Leite

A Demanda Bioquímica de Oxigênio do soro de leite varia de 30 a 60 g L⁻¹, dependendo do processamento específico utilizado na fabricação de queijos e do conteúdo de lactose (Brandão, 1994). Assim, devido ao aporte orgânico, o descarte de soro diretamente em cursos d'água acarreta, principalmente, consumo do O₂ dissolvido pelos microrganismos, podendo ocorrer a mortandade de peixes e outros indivíduos do ecossistema aquático (Araújo, 2001). Do mesmo modo, o soro, quando descartado no solo em doses excessivas, pode causar problemas de odor e também depleção de O₂ no meio (Jones et al., 1992).

Por ser gerado em grandes quantidades, mesmo possuindo elevada biodegradabilidade, a estabilização desse resíduo por métodos convencionais de tratamento biológico é dificultada (Machado et al., 2002). Dessa forma, o soro, quando considerado efluente industrial e despejado junto com os demais resíduos líquidos das indústrias de laticínios, pode comprometer a estação de tratamento de águas residuárias.

2.6. Uso de Águas Residuárias no Solo

As águas urbanas, industriais e agroindustriais são fontes de poluição para o ambiente, se nele forem dispostas indevidamente, seja pela introdução de substâncias orgânicas e inorgânicas, seja pela alteração das características físicas, químicas ou microbiológicas do meio (Matos, 2004).

A aplicação de resíduos orgânicos e águas residuárias no solo é uma prática comum, sendo considerada uma forma de tratamento e de disposição final. Por ser um sistema vivo e dinâmico, caracterizado por apresentar superfície física e quimicamente ativa, o solo pode reagir, interagir ou adsorver constituintes da água residuária (Matos, 2004).

Alguns resíduos agroindustriais, como os de laticínios, usinas de açúcar e álcool, fecularias e casas de farinha, apesar do seu alto potencial poluente, podem ser utilizados como fertilizantes, pois apresentam grande quantidade de nutrientes (Mélo, 2004). De modo geral, as principais alterações advindas da aplicação constante de águas residuárias no solo costumam ser químicas, o que pode, inclusive, vir a proporcionar alterações físicas (Matos, 2004).

Ao se verificarem alterações químicas de um solo agrícola, decorrentes da aplicação, em dias não chuvosos, de $99 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de uma água residuária de suinocultura, em diversas culturas, por oito anos consecutivos, constatou-se aumento relevante nas concentrações de cálcio, magnésio, sódio, nitrogênio, fósforo, potássio e matéria orgânica, sobretudo na camada de 0–30 cm do solo (Dal Bosco et al, 2008).

A aplicação de 80 e $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de manipueira na cultura da mandioca revelou aumento no teor de matéria orgânica e elevação da disponibilidade de fósforo e potássio no solo, com redução entre 40 e 80 % das plantas invasoras testadas, ao se verificar o efeito herbicida em plantas invasoras (Fioretto, 1994).

Hardan & Al-Ani (1978) observaram melhoria da estrutura do solo que recebeu águas residuárias do processamento de beterraba-açucareira e de tâmaras.

Com o objetivo de verificar o efeito do uso da torta de filtro e da vinhaça, como corretivos, na recuperação de um solo salino-sódico, foi realizado um experimento em casa de vegetação, utilizando solo aluvial, eutrófico, textura franca. Os autores concluíram que a lixiviação com a vinhaça mostrou resultados superiores aos apresentados pela água de chuva em todos os tratamentos, indicando a possibilidade de recuperação dos solos salino-sódicos com o uso da vinhaça, sem incorporação de corretivo convencional (Ruiz et al., 1997).

No entanto, o uso agrícola de águas residuárias deve ser cuidadosamente planejado, no sentido de controlar, a longo prazo, efeitos como salinidade, sodicidade e desbalanço de nutrientes sobre o solo e as culturas (Garcia, 2003). A aplicação de águas residuárias como fertirrigação deve ser definida pela capacidade do solo e das culturas em assimilar o resíduo aplicado, sem comprometimento da qualidade do solo e risco de contaminação das águas superficiais e subterrâneas e não, simplesmente, em função de taxas de aplicação laminares, definidas por critérios exclusivamente hidráulicos ou calculadas com base na evapotranspiração da cultura (Matos, 2006).

2.6.1. Uso do Soro de Leite no Solo

Em países como os Estados Unidos, líder mundial na produção de leite, cerca de 50 % do soro de leite é destinado à alimentação humana. No entanto, dependendo da localidade e de fatores econômicos, 20 % a 100 % desse resíduo é utilizado para benefício das características químicas e físicas do solo (Robbins & Lehrs, 1998).

A utilização de soro de queijo cottage em zonas áridas tem mostrado resultados favoráveis à recuperação de solos sódicos, diminuindo o pH do solo, a percentagem de sódio trocável (PST) e a razão de adsorção de sódio (RAS). Isso levou à melhora da estabilidade de agregados e da infiltração de água, bem como do rendimento das culturas (Robbins & Lehrs, 1992; Jones et al., 1993).

Lehrsch et al. (1994), ao aplicarem 808 t ha^{-1} de soro de leite, observaram aumento de 25 % para 80 % na estabilidade de agregados. A lactose do soro, quando aplicada no solo, estimula a atividade de organismos na produção de polissacarídeos, os quais contribuem para a estabilização dos agregados (Allison, 1968).

Ao avaliarem a resposta do capim-tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. Cv) à aplicação de soro ácido de leite, Gheri et al. (2003) verificaram que houve aumento da produção de matéria seca, sendo a produção máxima obtida com a aplicação de $390 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de soro de leite.

A quantidade de N, P e K fornecida pela aplicação de $640.000 \text{ L ha}^{-1}$ de soro de leite seis meses antes do plantio de milho correspondeu, respectivamente, a três, oito e seis vezes a absorvida pelo milho para uma produção de $3,2 \text{ t ha}^{-1}$ de grãos (Modler, 1987).

Excessivas aplicações de soro de leite no solo, no entanto, podem diminuir as taxas de infiltração a curto prazo, devido à sobrecarga orgânica (McAuliffe et al., 1982) e também ao excesso de óleos e graxas. Outro problema diz respeito à contaminação de águas superficiais e subterrâneas com compostos nitrogenados, quando o soro é aplicado em grande quantidade. Dessa forma, a aplicação monitorada de soro de leite no solo torna-se uma alternativa para o destino final desse efluente quando da inviabilidade do seu aproveitamento na alimentação humana ou animal, desde que haja facilidade de transporte e de aplicação desse efluente no campo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Em laboratório, foi realizado um ensaio utilizando colunas de solo nas quais foi feita percolação de soro de leite. Os tratamentos corresponderam a um fatorial 2 x 2, sendo amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVAd) e de um Cambissolo Flúvico Tb distrófico (CYbd) coletados em duas profundidades (0–20 e 20–40 cm) desses dois solos, no município de Paula Cândido, Zona da Mata de Minas Gerais.

Os locais de coleta foram selecionados entre aqueles com possibilidades de receber aplicações de soro de leite, considerando que áreas de encosta, representadas por LVAd, e terraços fluviais utilizados para pastagem, representados por CYbd, são comuns na região (Figura 1). Amostras das camadas de 0–20 e de 20–40 cm dessas classes de solo foram coletadas, secas ao ar e passadas em peneira com abertura de 2 mm, para a caracterização química, física e mineralógica (Quadro 2). Na análise mineralógica, as lâminas de argila natural foram montadas por esfregaço. A fim de melhor caracterizar os óxidos de ferro, as amostras de argila foram submetidas a tratamento químico com NaOH 5 mol L⁻¹, mantendo ebulição por 1h30min (Norrish & Taylor, 1961; Kampf & Schwertmann, 1982). Para identificação dos componentes mineralógicos, utilizou-se difratometria de raios X, em aparelho X'Pert PRO, radiação CoK α .

Os tratamentos foram dispostos num delineamento experimental em blocos casualizados, com cinco repetições. Cada unidade experimental foi constituída por amostras de solo colocadas em 11 anéis de PVC, com 6,6 cm de diâmetro e 7 cm de altura, sobrepostos e vedados com cola de silicone nas uniões. Na extremidade inferior do segmento foi adaptado um tampão de PVC perfurado, com funil a ele acoplado, empregando massa plástica para vedação. No último centímetro do anel inferior foi colocada uma camada fina de lã de vidro e, sobre esta, 1 cm de areia muito grossa (2,0–1,0 mm), para facilitar a drenagem. A seguir, foi colocada uma outra camada de lã de vidro, para evitar a mistura do solo com a areia.

As paredes internas dos anéis receberam uma camada de resina líquida, sobre a qual foi espalhada uma mistura de areia grossa e areia fina lavadas, a fim de evitar o escoamento preferencial de água pelas paredes da coluna. Externamente, os anéis foram fixados com fita adesiva, para estabilizar mecanicamente a coluna, que foi preenchida com solo até 7 cm da borda superior, formando uma coluna de 70 cm de altura e volume de 2,4 dm³.



Figura 1. Localização do LVAd (encosta degradada) e CYbd (terraço utilizado para pastagem).

Quadro 2. Caracterização química e física das amostras do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e do Cambissolo Flúvico Tb distrófico (CYbd)

Determinação	LVAd		CYbd	
	0–20 cm	20–40 cm	0–20 cm	20–40 cm
pH em água (1:2,5)	5,23	4,90	6,05	5,75
pH em KCl (1:2,5)	4,30	4,19	4,89	4,75
Condutividade elétrica (es) (mS m ⁻¹) ^{1/}	20,8	6,20	29,4	8,80
Condutividade elétrica (1:5) (mS m ⁻¹) ^{2/}	4,0	3,6	4,5	3,5
N total (mg dm ⁻³) ^{3/}	1570	980	1250	380
N-NH ₄ ⁺ (mg dm ⁻³) ^{3, 4/}	42,50	21,25	28,34	21,25
N-NO ₃ ⁻ (mg dm ⁻³) ^{3, 4/}	11,02	7,08	14,22	7,11
K (mg dm ⁻³) ^{5/}	54	16	105	113
Na (mg dm ⁻³) ^{5/}	4,80	1,70	4,80	3,80
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{6/}	1,30	0,38	2,47	1,18
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{6/}	0,77	0,22	1,23	0,71
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{7/}	0,30	0,90	0	0,10
P (mg dm ⁻³) ^{8/}	2,1	1,0	3,4	1,0
Matéria orgânica (g kg ⁻¹) ^{9/}	49,4	27,9	33,0	12,7
P remanescente (mg L ⁻¹) ^{10/}	28,30	20,20	44,70	34,50
Análise granulométrica ^{11/}				
- Areia (kg kg ⁻¹)	0,433	0,332	0,295	0,177
- Silte (kg kg ⁻¹)	0,076	0,081	0,239	0,328
- Argila (kg kg ⁻¹)	0,491	0,587	0,466	0,495
Argila dispersa em água (kg kg ⁻¹) ^{12/}	0,187	0,208	0,227	0,248
Índice de floculação (kg kg ⁻¹) ^{12/}	0,619	0,646	0,513	0,499
Densidade (kg dm ⁻³)				
- do solo (Ds) ^{13/}	0,96	0,95	0,98	0,95
- de partículas (Dp) ^{14/}	2,57	2,58	2,46	2,50
Porosidade (m ³ m ⁻³) ^{15/}	0,63	0,63	0,60	0,62
Equivalente de umidade (kg kg ⁻¹) ^{16/}	0,32	0,34	0,36	0,41
Mineralogia da fração argila ^{17/}				
(principais minerais)	Ct	Ct	Ct	Ct
	Mt	Mt	Gt	Gt
	Hm	Hm	An	An

^{1/} Condutividade elétrica no extrato da pasta de saturação (Richards, 1954). ^{2/} Condutividade elétrica no extrato 1:5 (Richards, 1954). ^{3/} Método de Kjeldahl (Tedesco et al., 1985). ^{4/} Extrator KCl 1 mol L⁻¹ (Tedesco et al., 1995). ^{5/} Extrator Mehlich-1 (Defelipo & Ribeiro, 1997). ^{6/} Extrator KCl 1 mol L⁻¹ (Vettori, 1969). ^{7/} Extrator KCl 1 mol L⁻¹ (Vettori, 1969). ^{8/} Extrator Mehlich-1 (Braga & Defelipo, 1974). ^{9/} Método de Walkley-Black modificado (Defelipo & Ribeiro, 1997). ^{10/} Alvarez V. et al., 2000. ^{11/} Ruiz, 2005. ^{12/} Ruiz, 2004. ^{13/} Método da proveta (Ruiz, 2004). ^{14/} Método do balão volumétrico (Ruiz, 2004). ^{15/} Porosidade = 1 - (Ds/Dp). ^{16/} Ruiz et al., 2003. ^{17/} Ct: caulinita, Mt: magnetita, Hm: hematita, Gt: goethita, An: anatásio.

O solo, peneirado por malha de 4 mm, foi colocado com auxílio de um funil, fazendo-se movimentos circulares para prevenir a segregação de agregados maiores no centro da coluna e, assim, alterar a seção de infiltração. Além disso, a coluna foi levemente compactada, deixando-a cair na vertical de uma altura de aproximadamente 0,5 cm do solo por três vezes, garantindo dessa forma o volume de solo desejado (2,4 dm³).

Com a finalidade de homogeneizar a umidade, o solo foi saturado com água deionizada 5 d antes do início do ensaio, com descarte do volume percolado. Após a saturação, a extremidade superior da coluna foi coberta com filme plástico, para evitar evaporação de água.

O soro de leite utilizado no experimento foi proveniente da fabricação de queijo minas frescal (Quadro 3).

Quadro 3. Caracterização física, química e bioquímica do soro de leite

Característica	Valor
pH ^{1/}	4,73
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹) ^{1/}	6,12
Demanda bioquímica de oxigênio (g L ⁻¹) ^{2/}	37,93
Demanda química de oxigênio (g L ⁻¹) ^{3/}	68,11
Óleos e graxas (g L ⁻¹) ^{4/}	3,01
Sólidos totais (g L ⁻¹) ^{1/}	67,59
Sólidos fixos totais (g L ⁻¹) ^{1/}	5,51
Sólidos voláteis totais (g L ⁻¹) ^{1/}	62,08
Sólidos suspensos totais (g L ⁻¹) ^{1/}	3,77
Sólidos suspensos fixos (g L ⁻¹) ^{1/}	0,07
Sólidos suspensos voláteis (g L ⁻¹) ^{1/}	3,70
Sólidos dissolvidos totais (g L ⁻¹) ^{1/}	63,83
N total (mg L ⁻¹) ^{5/}	1290
N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹) ^{5/}	228
N-NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹) ^{5/}	72
K (mg L ⁻¹) ^{6/}	1656
Na (mg L ⁻¹) ^{6/}	456
Ca (mg L ⁻¹) ^{7/}	555
Mg (mg L ⁻¹) ^{7/}	75
P (mg L ⁻¹) ^{8/}	422

^{1/} APHA, 1995. ^{2/} Método de Winkler (iodométrico) (APHA, 1995). ^{3/} Método do refluxo aberto (APHA, 1995). ^{4/} Método da extração em Soxhlet (APHA, 1995). ^{5/} Método de Kjeldahl (Tedesco et al., 1985). ^{6/} Fotometria de emissão de chama. ^{7/} Espectrofotometria de absorção atômica. ^{8/} Espectrofotometria de emissão em plasma (ICP-AES).

As colunas de percolação contendo o solo receberam quatro aplicações de 0,2 volume de poros de soro de leite a intervalos de 6 d. Após 24 h de cada aplicação, o percolado foi recolhido e o volume determinado. Recolheu-se também o percolado produzido entre 24 e 120 h. Amostras foram devidamente conservadas sob refrigeração, para posterior análise. As determinações realizadas nos percolados compreenderam pH, condutividade elétrica (CE), demanda química de oxigênio (DQO), N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, Na, K, Ca e Mg, seguindo os mesmos métodos citados na caracterização do soro de leite. Com o volume percolado e as concentrações de N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, Na, K, Ca e Mg na solução percolada, calculou-se a quantidade perdida de cada soluto por lixiviação.

Depois de 6 d da última aplicação de soro de leite, as colunas foram desmontadas, retirando-se, para análise, o solo contido nos 5 cm centrais de cada anel. As análises realizadas compreenderam: pH em água, condutividade elétrica (1:5) e teores de N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, K, Na, Ca, Mg, Al e P.

Como complemento, foi quantificada a evolução do C-CO₂ nas amostras dos dois anéis localizados nas extremidades de cada coluna. O método utilizado foi o estático (Curl & Rodriguez-Kabana, 1972). As amostras de solo foram umedecidas até 0,7 % do equivalente de umidade para restabelecimento da atividade microbiana e, em seguida, incubadas em recipientes plásticos herméticos. A captura do CO₂, resultante da respiração dos microrganismos, foi feita em solução de NaOH, e sua dosagem, por titulação com HCl. A primeira dosagem foi realizada com 12 h de incubação, sendo as demais realizadas em intervalos de 24 h, até completar 348 h de incubação. A produção total de CO₂, em g kg⁻¹, foi igual ao somatório dos valores obtidos em cada amostragem.

Os resultados experimentais foram analisados estatisticamente, a fim de verificar a mobilidade e a distribuição dos solutos nas colunas de solo e as quantidades nos percolados. As variáveis dependentes foram analisadas por meio de contrastes ortogonais, para comparar classe de solo e profundidade de amostragem. Os resultados foram apresentados na forma de contrastes médios (Alvarez V. & Alvarez, 2006). Na análise de evolução de CO₂, os contrastes foram utilizados em acréscimo, para

comparar a localização da amostra na coluna de solo. Os valores determinados nos anéis das colunas de solo foram analisados por regressão, utilizando a profundidade média como variável dependente. Utilizou-se também regressão para ajustar a produção acumulada de C-CO₂ ao tempo de incubação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O soro de leite é um efluente da indústria láctea cuja composição o qualifica como excelente meio de cultura para o crescimento de microrganismos. Essa característica dificultou a condução do experimento no ambiente confinado das colunas de solo, devido ao aparecimento de colônias de fungos e bactérias, que provocaram alterações na velocidade de infiltração nas diferentes lixiviações.

O crescimento de microrganismos, detectado no dia imediatamente posterior à primeira aplicação de soro de leite, associado ao elevado teor de materiais em suspensão e gordura no resíduo, contribuiu para a formação de selo superficial, com apreciável decréscimo na condutividade hidráulica do solo na coluna (Figura 2). Na tentativa de facilitar a infiltração, realizou-se escarificação no anel superior, mas o resultado não foi satisfatório.

Paralelamente, os processos fermentativos ocorriam também em profundidade. Os gases produzidos, os quais provocaram a quebra da continuidade do fluido no meio poroso, acentuaram o decréscimo da condutividade hidráulica na coluna.

De forma geral, a maioria das colunas, mesmo após a escarificação do primeiro anel, mostrou problemas de entupimento nas aplicações seguintes, independentemente da classe de solo ou camada amostrada.



Figura 2. Materiais em suspensão e colônias de microrganismos nos anéis superiores, após um dia da aplicação do soro. Da esquerda para a direita: LVAAd (0–20 cm), LVAAd (20–40 cm) e duas unidades experimentais de CYbd (20–40 cm).

Quanto ao recolhimento dos lixiviados, houve queda acentuada do volume no transcurso das lixiviações. Isso, inclusive, poderia ter provocado mistura entre os efluentes das últimas aplicações. Os problemas anotados levaram a descartar o solo do anel superior, submetido à escarificação, e a considerar somente as duas lixiviações iniciais nos resultados apresentados.

4.1. Mobilidade e Distribuição de Solutos

A aplicação de soro de leite nos solos estudados causou decréscimo generalizado no pH (Quadros 2 e 4) – resposta coerente com a acidez do resíduo aplicado (Quadro 3). O decréscimo foi proporcional aos valores apresentados na caracterização (Quadro 2), registrando-se menor pH no LVAAd e nas amostras das camadas inferiores dos dois solos em estudo (Quadro 5). Houve diminuição mais acentuada do pH no CYbd, que, pela caracterização, pode ter recebido aplicação de calcário em doses superiores às incorporadas no LVAAd. Essa incorporação seria corroborada pela diferença de pH nas amostras das duas camadas de cada solo, com valores maiores na camada superior.

Quadro 4. pH, condutividade elétrica (1:5), N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, K, Na, Ca, Mg, Al, e P, de acordo com o solo e a camada amostrada, após quatro lixiviações com soro de leite

Determinação	LVAd		CYbd	
	0–20 cm	20–40 cm	0–20 cm	20–40 cm
pH	4,75	4,36	5,19	4,44
Condutividade elétrica (mS m ⁻¹)	61,8	60,8	71,8	72,0
N total (mg dm ⁻³)	1997	1336	1681	689
N-NH ₄ ⁺ (mg dm ⁻³)	140	117	123	66
N-NO ₃ ⁻ (mg dm ⁻³)	64	74	61	57
K (mg dm ⁻³)	568	567	611	601
Na (mg dm ⁻³)	143	162	144	146
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,87	1,03	2,83	1,38
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,81	0,32	1,07	0,55
Al (cmol _c dm ⁻³)	2,47	3,99	1,34	3,35
P (mg dm ⁻³)	6,90	8,70	19,50	19,40

Quadro 5. Contrastes ortogonais médios (C) do pH, condutividade elétrica (1:5), N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, K, Na, Ca, Mg, Al, e P, de acordo com o solo e a camada amostrada, após quatro lixiviações com soro de leite^{1/}

Determinação	C1	C2	C3
pH	-0,26*	0,40*	0,76*
Condutividade elétrica (mS m ⁻¹)	-10,6*	1,0	-0,2
N total (mg dm ⁻³)	482*	661*	992*
N-NH ₄ ⁺ (mg dm ⁻³)	35*	23*	57*
N-NO ₃ ⁻ (mg dm ⁻³)	10	-10	4
K (mg dm ⁻³)	-38	1	10
Na (mg dm ⁻³)	7	-19	-2
Ca (cmol _c dm ⁻³)	-0,66*	0,85*	1,45*
Mg (cmol _c dm ⁻³)	-0,25*	0,49*	0,52*
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,885*	-1,52*	-2,01*
P (mg dm ⁻³)	VNH ^{2/}	-1,8	0,2

^{1/} C1: LVAd vs CYbd. C2: camada 0–20 cm vs camada 20–40 cm d/LVAd. C3: camada 0–20 cm vs camada 20–40 cm d/CYbd. ^{2/} VNH: variâncias não homogêneas.

* Significativo a 5 % pelo teste F.

A incorporação de soro de leite, com sua elevada concentração eletrolítica, provocou aumento generalizado na condutividade elétrica (CE) do extrato 1:5 (Quadro 4). Comparando as CEs do extrato da pasta de saturação e as do extrato 1:5 (Quadro 2), observa-se que as CEs determinadas nas condições experimentais aproximam-se do limite de

4 dS m⁻¹, indicado por Richards (1954) para diferenciar solos normais e salinos. Na comparação entre solos, a maior tendência à salinização se deu no solo de baixada (CYbd), sem diferença entre camadas do mesmo solo (Quadro 5). Essa resposta pode ser atribuída à CE do resíduo aplicado, muito maior que a dos solos amostrados (Quadros 2 e 3). Com mineralogia semelhante, as duas camadas de cada solo apresentaram o mesmo comportamento.

Por associação, é sabido que os sais solúveis contidos nas águas de irrigação podem, em certas condições climáticas, salinizar o solo e modificar sua composição iônica no complexo sortivo, alterando suas características físicas e químicas e, conseqüentemente, o regime de umidade, aeração, disponibilidade de nutrientes, desenvolvimento vegetativo e produtividade (Pizarro, 1990). Esse problema pode ser agravado quando ocorre aplicação de doses excessivas de águas residuárias no solo. Os problemas no solo associados ao uso de águas residuárias estão relacionados à salinidade, à sodicidade, ao excesso de nutrientes, aos bicarbonatos e à variação do pH (Ayers & Westcot, 1999). Águas residuárias em taxas e frequências inadequadas contribuem, também, para o entupimento dos poros das camadas superficiais dos solos, causando selamento superficial. A velocidade de infiltração básica de águas residuárias e mesmo de água de chuva ou irrigação será reduzida se o tempo entre aplicações de águas residuárias for muito curto - insuficiente para que ocorra a destruição física, química ou microbiológica do material responsável pelo selamento superficial. A diminuição da capacidade de infiltração de águas residuárias ou água de chuva ou irrigação no solo irá proporcionar perigo real se o resíduo alcançar diretamente ou for carregado até os canais de drenagem e os cursos de água da região, contaminando-os (Matos, 2004).

Considerando os compostos nitrogenados (N total, NH₄⁺ e NO₃⁻), observa-se que, em todos os casos, a aplicação de soro de leite causou a elevação da sua disponibilidade (Quadros 2 e 4), em consonância com as concentrações elevadas no soro de leite (Quadro 3). Contudo, a relação N total : N-NH₄⁺ : N-NO₃⁻ apresentou particularidades (Quadro 6). Houve incremento maior no N assimilável (N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻) em decorrência dos

processos de mineralização da matéria orgânica e da maior concentração dessas formas em relação ao N total no soro de leite incorporado. As camadas de 20–40 cm, com menores teores de matéria orgânica e menos tamponadas, tiveram relações próximas às do soro de leite aplicado (Quadro 6).

Os contrastes correspondentes mostram que houve diferenças estatisticamente significativas para N total e N-NH_4^+ entre solos e entre camadas dentro de cada solo. O maior acréscimo foi no LVAd e nas camadas superiores dentro de cada solo (Quadro 5). Os menores teores de N-NO_3^- e a menor interação com o complexo de troca iônica do solo não permitiram evidenciar diferenças estatisticamente significativas nos contrastes analisados.

A análise química do solo revelou acréscimos decrescentes de N total, N-NH_4^+ e N-NO_3^- após aplicação do soro de leite. Resultados semelhantes foram encontrados por Gheri et al. (2003), ao aplicarem soro de leite em amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo em área de pastagem degradada. Segundo esses autores, apesar das altas doses de N fornecidas ao solo com a aplicação desse resíduo, não houve aumento significativo do N total. Esse fato indica que a taxa de mineralização dos compostos de N foi suficientemente rápida a ponto de não permitir acúmulo desses compostos no solo, contrariando a afirmação de Modler (1987), de que o N do soro de leite é apenas lentamente mineralizável.

Quadro 6. Relação N total : N-NH_4^+ : N-NO_3^- no solo (na caracterização e após quatro lixiviações) e no soro de leite aplicado

Material	LVAd		CYbd	
	0–20 cm	20–40 cm	0–20 cm	20–40 cm
Solo				
• Na caracterização	142,5 : 3,9 : 1	138,4 : 3,0 : 1	87,9 : 2,0 : 1	53,5 : 3,0 : 1
• Após lixiviações	31,2 : 2,2 : 1	18,1 : 1,6 : 1	27,6 : 2,0 : 1	12,1 : 1,2 : 1
Soro de leite	17,9 : 3 : 1			

Considerando os cátions alcalinos e alcalino-terrosos, observa-se incremento generalizado dos teores de K, Na, Ca e Mg no solo após aplicação do soro de leite, em relação aos valores determinados na caracterização (Quadros 2 e 4). Contudo, somente foram registradas diferenças estatisticamente significativas para Ca e Mg tanto na comparação entre solos quanto na comparação entre camadas (Quadro 5). Observa-se que o soro de leite apresentou elevadas concentrações de K e Na (Quadro 3), encontrando-se esses cátions em menor concentração no complexo de troca, como mostrado na caracterização (Quadro 2). A característica do fluido deslocador levou os teores de Na e K próximos aos da caracterização do solo após as quatro aplicações, considerando que suas características texturais e mineralógicas são semelhantes (Quadro 4).

Para permitir comparação, os teores de K e Na disponíveis e de Ca e Mg trocáveis na caracterização prévia e posterior às lixiviações no solo (Quadros 2 e 4), bem como a concentração desses mesmos elementos no soro de leite (Quadro 3), foram recalculados, sendo seus valores expressos em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e $\text{cmol}_c \text{L}^{-1}$, respectivamente (Quadro 7). As relações K : Na : Ca : Mg assim calculadas permitem avançar na discussão do tema.

A relação Ca : Mg, com extremos de 1,69 e 2,01:1 no solo antes do ensaio, foi incrementada para o intervalo de 2,31 e 3,22:1 após as lixiviações. Do ponto de vista nutricional, a aplicação de soro de leite, portanto, não provocaria desequilíbrio desses dois nutrientes, considerando que sua relação Ca : Mg é de 4,44:1 (Quadro 7).

Cuidados maiores devem ser considerados com relação ao K e, especialmente, ao Na. Tomando o Mg como referência, valores de K entre 0,18 e 0,41:1 elevaram-se até 4,53:1 (Quadro 7). O Na, próximo de 0,03:1 em todos os casos, incrementou até 2,19:1 no LVAd, amostrado entre 20 e 40 cm (Quadro 7). As relações Na : Mg foram mais elevadas nas camadas mais profundas dos dois solos, indicando maior suscetibilidade à salinização em amostras com menor teor de matéria orgânica.

Quadro 7. Teores de K, Na, Ca e Mg no solo (na caracterização e após quatro lixiviações) e no soro de leite aplicado

Material	K	Na	Ca	Mg	K:Na:Ca:Mg
Solo na caracterização (cmol _c dm ⁻³)					
LVA _d (0–20 cm)	0,14	0,02	1,30	0,77	0,18 : 0,03 : 1,69 : 1
LVA _d (20–40 cm)	0,04	0,01	0,38	0,22	0,18 : 0,05 : 1,73 : 1
CY _{bd} (0–20 cm)	0,27	0,02	2,47	1,23	0,22 : 0,02 : 2,01 : 1
CY _{bd} (20–40 cm)	0,29	0,02	1,18	0,71	0,41 : 0,03 : 1,66 : 1
Solo após lixiviações (cmol _c dm ⁻³)					
LVA _d (0–20 cm)	1,46	0,62	1,87	0,81	1,80 : 0,77 : 2,31 : 1
LVA _d (20–40 cm)	1,45	0,70	1,03	0,32	4,53 : 2,19 : 3,22 : 1
CY _{bd} (0–20 cm)	1,57	0,63	2,83	1,07	1,47 : 0,59 : 2,64 : 1
CY _{bd} (20–40 cm)	1,54	0,63	1,38	0,55	2,80 : 1,15 : 2,51 : 1
Soro de leite (cmol _c L ⁻¹)					
	4,25	1,98	2,78	0,63	6,79 : 3,17 : 4,44 : 1

Conforme verificado pelas elevadas CEs no solo após a aplicação do soro, ficou evidenciada a tendência de salinização desses solos com o aumento do volume de soro aplicado. A relação Na : Mg desse resíduo da indústria láctea, de 3,14 : 1, reforça a necessidade de utilização criteriosa. Por outro lado, a relação K : Na : Ca : Mg do soro de leite, de 6,75 : 3,14 : 4,41 : 1, indica a possibilidade de perda de Mg por lixiviação, por deslocamento deste nutriente do complexo de troca, devido às elevadas concentrações de K, Na e Ca (Quadro 7).

O teor de Al trocável, na caracterização do solo, era baixo (LVA_d) ou praticamente nulo (CY_{bt}), em concordância com o pH determinado (Quadro 2). Essa diferença pode ser atribuída ao fato de o LVA_d situar-se numa encosta degradada e de a maior concentração de Ca trocável no CY_{bd} permitir indicar a aplicação de calcário nesse solo. Após a aplicação do soro de leite, os teores de Al elevaram-se acentuadamente nos dois solos e camadas em estudo (Quadro 4). Na comparação entre solos, o LVA_d continuou com valores mais elevados (Quadro 5). Já na comparação entre camadas dentro de cada solo, a matéria orgânica da amostra

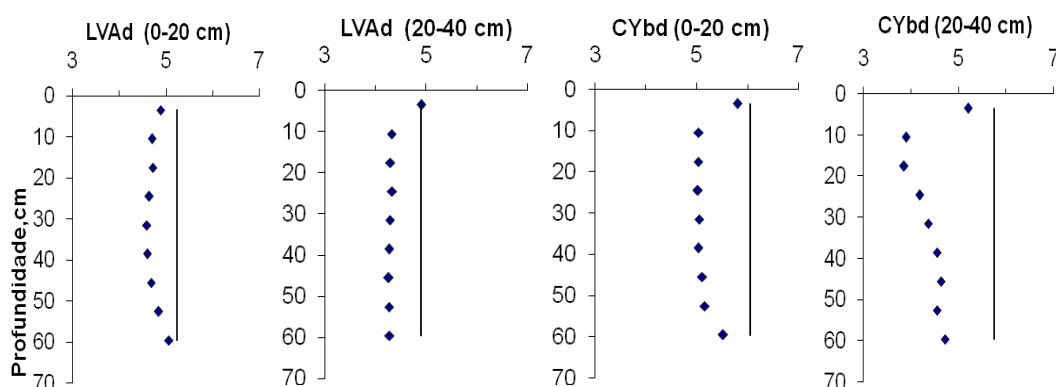
superficial contribuiu para diminuir a atividade do Al no complexo de troca. O decréscimo do pH no solo pode ter contribuído para solubilizar compostos com Al, principalmente na camada de 20–40 cm, onde a correção do solo foi menos efetiva (Quadro 4). No entanto, deve-se levar em consideração que determinações de altos teores médios de acidez trocável no solo após aplicação do soro de leite sugerem interferência de íons trocáveis, como H^+ e outros de caráter ácido. O método de titulação utilizado (Vettori, 1969) não é específico para Al, mas envolve a quantificação de todas as formas ácidas presentes. Como houve intensos processos fermentativos no decorrer do ensaio, a acidez trocável certamente elevou-se com a contribuição adicional de outros ácidos, especialmente orgânicos. A liberação de Al estrutural da caulinita não aparece como causa provável dos teores de Al registrados. Nesse caso, o tempo de contato não seria suficientemente prolongado para ser responsabilizado pela dissociação de Al.

O teor de P disponível elevou-se consideravelmente em todas as amostras estudadas (Quadro 4). Como o P acrescentado por meio do soro de leite (Quadro 3) foi sensivelmente superior ao disponível na caracterização (Quadro 2), os valores determinados nas amostras das duas camadas não mostraram diferenças estatisticamente significativas entre si (Quadro 5).

Para determinar a mobilidade e distribuição de solutos nas colunas de solo, os valores de pH, Al, CE (1:5), N total, $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, K, Na, Ca, Mg, e P foram relacionados com a localização de cada anel. A fim de determinar equações de regressão, as variáveis dependentes foram analisadas estabelecendo-se a profundidade média no anel como variável independente. Considerando o comprimento de 7 cm de cada anel e que foram realizadas determinações em nove anéis, os valores da variável independente ficaram entre 3,5 e 59,5 cm.

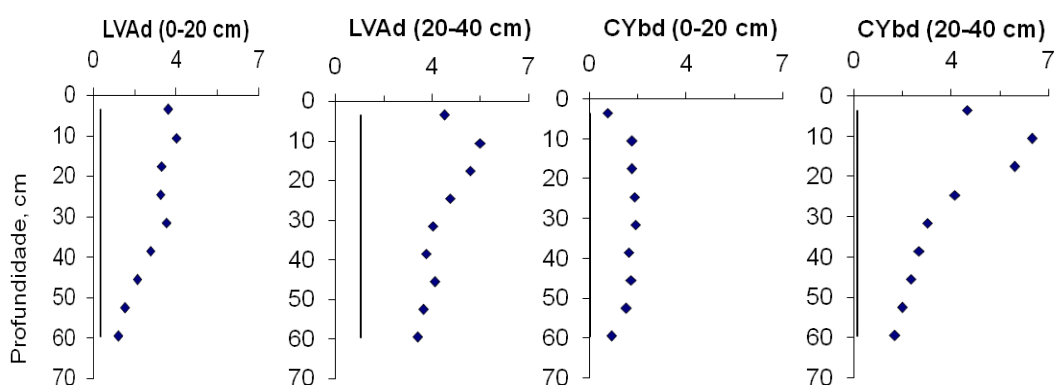
As representações das curvas e as respectivas equações de regressão são apresentadas nas figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8, nas quais foi traçada uma linha vertical que indica a caracterização de cada variável dependente em análise, permitindo imediata comparação com os solos e as camadas amostradas antes do ensaio.

pH



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVAd (0–20 cm)	$\hat{y} = 4,986 - 0,02706* P + 0,0004682* P^2$	0,937
LVAd (20–40 cm)	$\hat{y} = 4,202 + 2,344*/P$	0,951
CYbd (0–20 cm)	$\hat{y} = 6,904 - 0,7653* P^{0,5} + 0,07465* P$	0,887
CYbd (20–40 cm)	$\hat{y} = 10,16 - 3,99* P^{0,5} + 0,797* P - 0,0484* P^{1,5}$	0,962

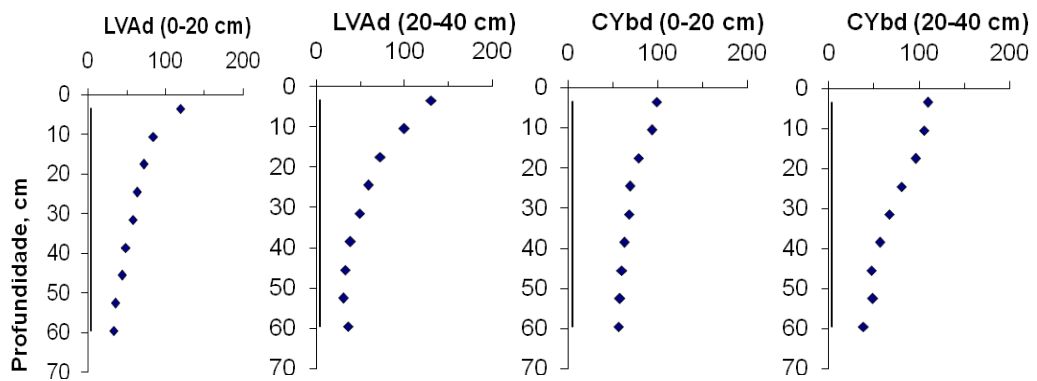
Al, cmol_cdm⁻³



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVAd (0–20 cm)	$\hat{y} = \hat{Y} = 3,236 + 0,009571 P - 0,0008100* P^2$	0,936
LVAd (20–40 cm)	$\hat{y} = \hat{Y} = 1/(0,1764 + 0,002697* P)$	0,906
CYbd (0–20 cm)	$\hat{y} = -0,8424 + 1,014* P^{0,5} - 0,1017* P$	0,889
CYbd (20–40 cm)	$\hat{y} = 1/(0,09448 + 0,008994* P)$	0,900

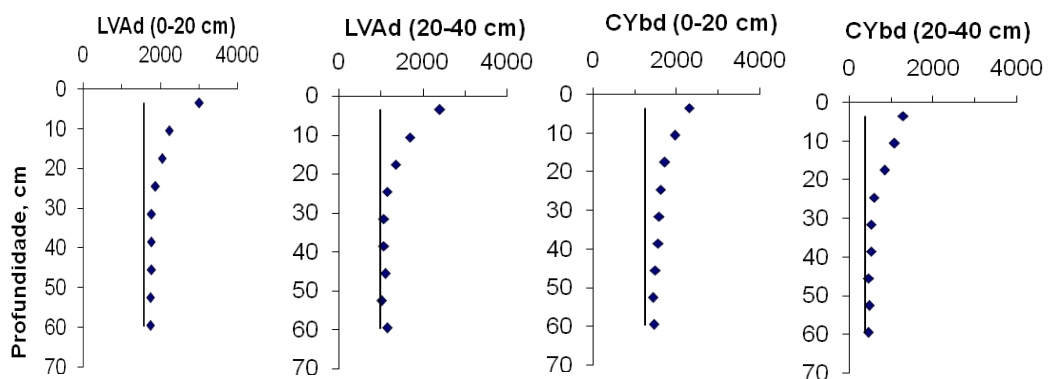
Figura 3. Distribuição e equações de regressão relacionando o pH e Al trocável, de acordo com a profundidade nas colunas de solo. O traço na vertical indica o valor na caracterização preliminar do solo. * Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.

Condutividade Elétrica (1:5), mS m⁻¹



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVAd (0–20 cm)	$\hat{y} = 160,6 - 26,13* P^{0,5} + 1,266* P$	0,989
LVAd (20–40 cm)	$\hat{y} = 143,3 - 4,562* P + 0,04640* P^2$	0,994
CYbd (0–20 cm)	$\hat{y} = 1/(0,0001002 + 0,000001405* P)$	0,955
CYbd (20–40 cm)	$\hat{y} = 63,05 + 44,94* P^{0,5} - 12,28* P + 0,7881* P^{1,5}$	0,992

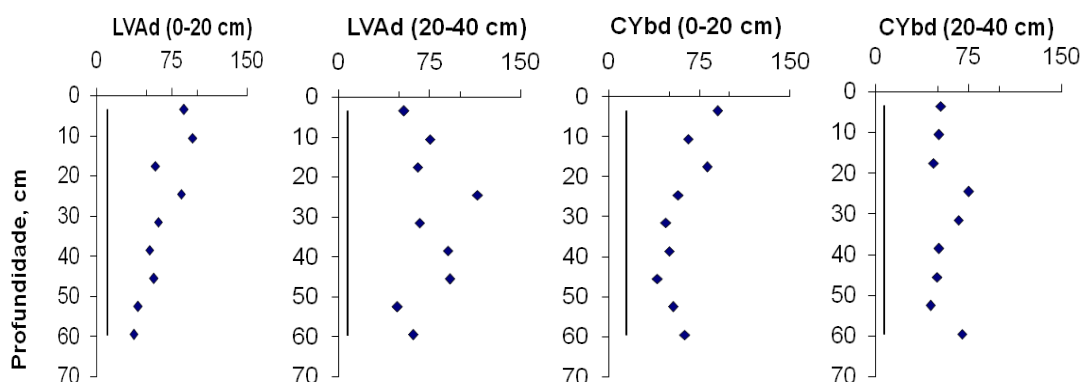
N total, mg dm⁻³



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVAd (0–20 cm)	$\hat{y} = 4159 - 745,9* P^{0,5} + 57,03* P$	0,984
LVAd (20–40 cm)	$\hat{y} = 995,5 + 5158*/P$	0,952
CYbd (0–20 cm)	$\hat{y} = 2940 - 389,1* P^{0,5} + 25,57* P$	0,990
CYbd (20–40 cm)	$\hat{y} = 1962 - 378,8* P^{0,5} + 23,41* P$	0,965

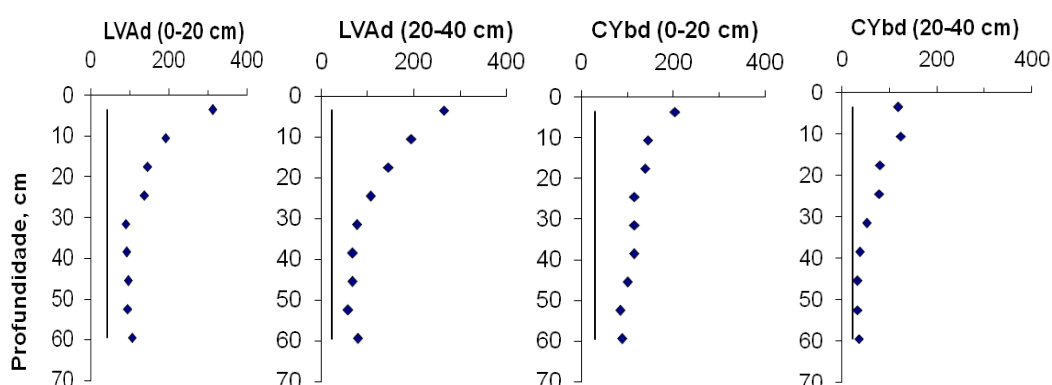
Figura 4. Distribuição e equações de regressão relacionando a condutividade elétrica (1:5) e o N total, de acordo com a profundidade nas colunas de solo. O traço na vertical indica o valor na caracterização preliminar do solo.* Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.

N-NO₃⁻, mg dm⁻³



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVAd (0–20 cm)	$\hat{y} = 1/(0,008865 + 0,0002642* P)$	0,809
LVAd (20–40 cm)	$\hat{y} = \bar{Y} = 74$	
CYbd (0–20 cm)	$\hat{y} = \bar{Y} = 61$	
CYbd (20–40 cm)	$\hat{y} = \bar{Y} = 57$	

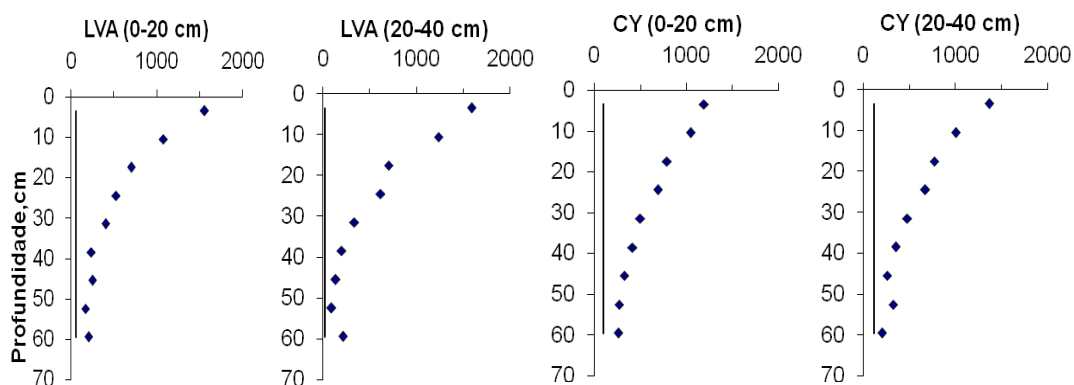
N-NH₄⁺, mg dm⁻³



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVAd (0–20 cm)	$\hat{y} = 516,0 - 129,2* P^{0,5} + 9,843* P$	0,985
LVAd (20–40 cm)	$\hat{y} = 295,9 - 10,53* P + 0,1159* P^2$	0,995
CYbd (0–20 cm)	$\hat{y} = 264,6 - 40,51* P^{0,5} + 2,315* P$	0,951
CYbd (20–40 cm)	$\hat{y} = 22,58 + 94,82* P^{0,5} - 26,41* P + 1,861* P^{1,5}$	0,970

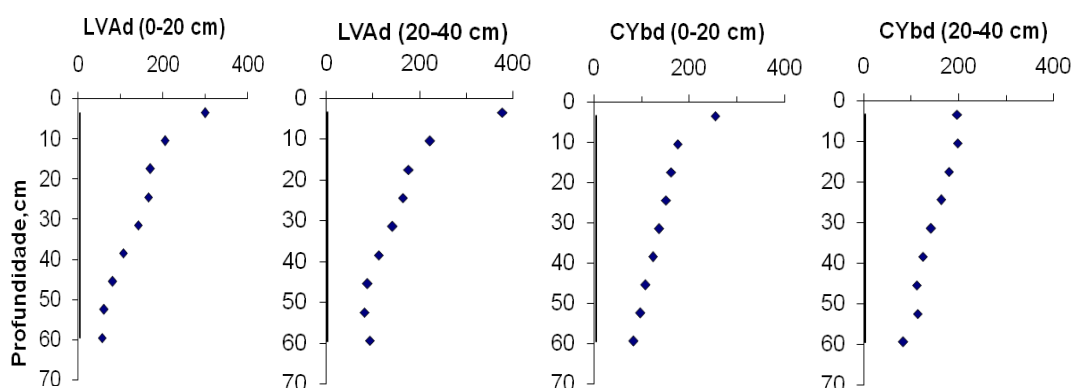
Figura 5. Distribuição e equações de regressão relacionando o N-NO₃⁻ e o N-NH₄⁺, de acordo com a classe de solo e a profundidade nas colunas de solo. O traço na vertical indica o valor na caracterização preliminar do solo.* Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.

K, mg dm⁻³



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVA _d (0–20 cm)	$\hat{y} = 2573 - 599,9* P^{0,5} + 37,42* P$	0,994
LVA _d (20–40 cm)	$\hat{y} = 1832 - 70,23* P + 0,7182* P^2$	0,989
CY _{bd} (0–20 cm)	$\hat{y} = 1331 - 34,12* P + 0,2686* P^2$	0,994
CY _{bd} (20–40 cm)	$\hat{y} = 1997 - 365,3* P^{0,5} + 17,24* P$	0,988

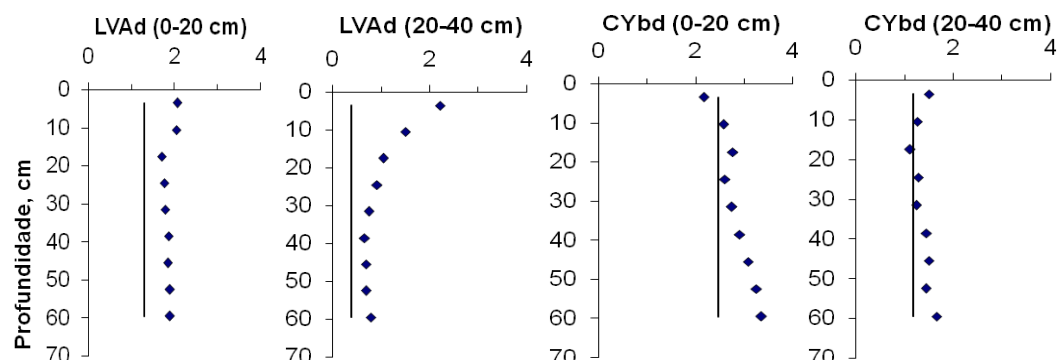
Na, mg dm⁻³



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVA _d (0–20 cm)	$\hat{y} = 387,4 - 55,89* P^{0,5} + 1,653 P$	0,976
LVA _d (20–40 cm)	$\hat{y} = 572,2 - 127,1* P^{0,5} + 8,381* P$	0,974
CY _{bd} (0–20 cm)	$\hat{y} = 1/(0,003677 + 0,0001268* P)$	0,966
CY _{bd} (20–40 cm)	$\hat{y} = 211,8 - 2,094* P$	0,970

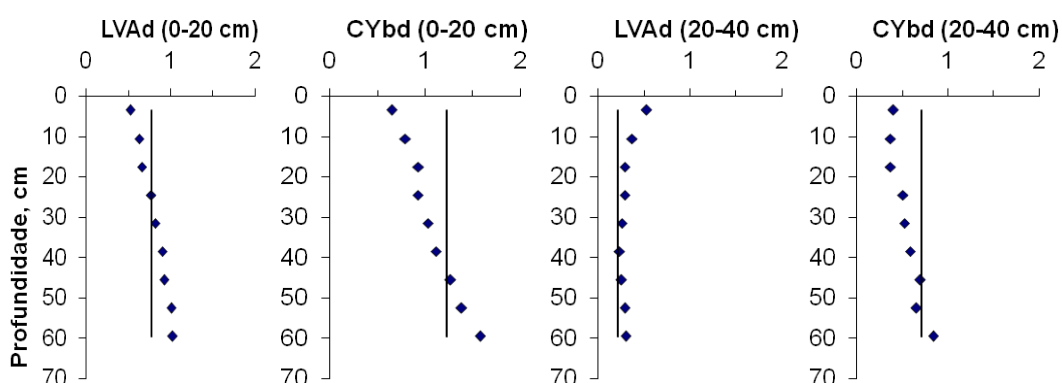
Figura 6. Distribuição e equações de regressão relacionando o K e Na disponíveis, de acordo com a profundidade nas colunas de solo. O traço na vertical indica o valor na caracterização preliminar do solo.* Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.

Ca, cmol_c dm⁻³



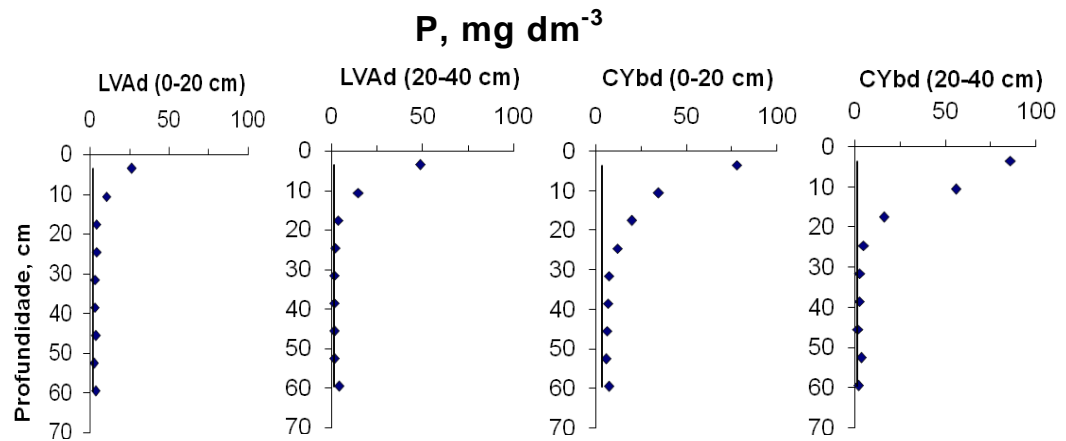
Solo	Equação de Regressão	R ²
LVAd (0–20 cm)	$\hat{y} = \hat{Y} = \bar{Y} = 1,87$	
LVAd (20–40 cm)	$\hat{y} = 3,674 - 0,9037* P^{0,5} + 0,06822* P$	0,996
CYbd (0–20 cm)	$\hat{y} = 2,256 + 0,01833* P$	0,910
CYbd (20–40 cm)	$\hat{y} = 2,001 - 0,3565* P^{0,5} + 0,04052* P$	0,825

Mg, cmol_c dm⁻³



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVAd (0–20 cm)	$\hat{y} = 0,5220 + 0,009024* P$	0,981
LVAd (20–40 cm)	$\hat{y} = 0,8355 - 0,1942* P^{0,5} + 0,01623* P$	0,980
CYbd (0–20 cm)	$\hat{y} = 0,5987 + 0,01508* P$	0,970
CYbd (20–40 cm)	$\hat{y} = 0,5087 - 0,09540* P^{0,5} + 0,01741* P$	0,942

Figura 7. Distribuição e equações de regressão relacionando o Ca e o Mg trocáveis, de acordo com a profundidade nas colunas de solo. O traço na vertical indica o valor na caracterização preliminar do solo. * Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.



Solo	Equação de Regressão	R ²
LVAd (0–20 cm)	$\hat{y} = 1,024 + 88,86^*/P$	0,985
LVAd (20–40 cm)	$\hat{y} = -3,119 + 179,4^*/P$	0,980
CYbd (0–20 cm)	$\hat{y} = 1,420 + 274,2^*/P$	0,983
CYbd (20–40 cm)	$\hat{y} = 174,7 - 53,38^* P^{0,5} + 4,061^* P$	0,968

Figura 8. Distribuição e equações de regressão relacionando o P disponível, de acordo com a profundidade nas colunas de solo. O traço na vertical indica o valor na caracterização preliminar do solo. * Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.

A movimentação do soro de leite ao longo da coluna levou à diminuição do pH em toda a profundidade da unidade experimental (Figura 3). Como previamente indicado, à acidez do produto, Ph 4,73 (Quadro 3), acrescentaram-se processos de oxidação de matéria orgânica que contribuíram para essa diminuição do pH. Da comparação com a acidez trocável (Figura 3) depreende-se que essas duas características mostraram valores que, representados graficamente, aproximam-se de imagens especulares, com destaque para as duas camadas amostradas do CYbt. Essa resposta não é tão evidente na porção superior das colunas preenchidas com amostras do LVAd. A elevada concentração de material orgânico neste solo, aparentemente, atuou tamponando o pH, sem prejuízo de liberação de Al.

A CE do extrato 1:5 mostra movimentação de eletrólitos ao longo da coluna, com apreciável lixiviação (Figura 4). Essa afirmativa é comprovada pelos valores determinados nas extremidades inferiores das colunas,

sempre superiores a $34,0 \text{ mS m}^{-1}$ (Quadro 8). A concentração associada a essa CE é de aproximadamente $3,5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ (Richards, 1954).

Os compostos nitrogenados (total, NH_4^+ e NO_3^-) apresentaram resposta diferenciada (Figuras 4 e 5). O N total, integrado por, no máximo, 18 % de $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$ (Quadro 4), estando o restante ligado a moléculas orgânicas de maior massa molecular e, eventualmente, de menor solubilidade, o que dificulta sua dissolução, registrou transporte apreciável até aproximadamente a metade da coluna. O NH_4^+ , interagindo com o complexo de troca catiônica do solo, movimentou-se ao longo da coluna, porém com maior disponibilidade na porção superior. O NO_3^- foi o composto nitrogenado mais móvel, pela sua maior solubilidade e menor interação com as partículas do solo. De todos os íons estudados, o NO_3^- foi o único que não teve ajuste adequado na análise de regressão (Quadro 8, Figura 5).

Comparando o transporte de K, Na, Ca e Mg nas colunas (Figuras 6 e 7), observa-se que as concentrações elevadas de K, Na e Ca (Quadro 3), em relação à do Mg, provocaram deslocamento de Mg do complexo de troca e acentuada lixiviação. Isso é comprovado pela forma das curvas deste cátion (Figura 7) onde se determinaram concentrações inferiores àquelas da caracterização na porção superior das colunas. Essa resposta é menos visualizada para o Ca (Figura 7), devido à sua maior concentração no soro de leite (Quadro 3) e à maior interação com o complexo de troca catiônica do solo.

O P, como esperado, pouco se movimentou nas colunas (Figura 8). Esse transporte foi ainda menor no LVAd, mais oxídico, que no CYbt. Oliveira et al. (2004) determinaram coeficiente de retardamento mínimo de 12 volume de poros para P, em solos argilosos. Nas condições experimentais, o soro de leite aplicado não chegou a um volume de poros.

4.2. Evolução de C-CO₂

A atividade dos microrganismos que atuam na mineralização da matéria orgânica do solo pode ser medida pelo CO₂ liberado (Passos et al., 2007). Os valores de produção acumulada média de CO₂ no solo após aplicação de soro de leite são apresentados no quadro 9.

Pelos contrastes analisados, verifica-se que houve diferenças com relação aos solos estudados, mas não na profundidade de amostragem de cada solo (Quadro 10). Evidenciou-se, também, que o soro favoreceu a atividade microbiana nos anéis superiores de solo, que receberam maior carga do resíduo.

Na comparação entre solos, o LVAd apresentou maior teor de matéria orgânica antes dos tratamentos (Quadro 2) e maior teor de N total após aplicação do soro (Quadro 4). Entretanto, essas não foram as únicas características que justificaram as diferenças apontadas. Se assim fosse, esperar-se-iam respostas diferenciadas entre camadas do mesmo solo, o que não aconteceu (Quadros 2, 4, 9 e 10).

Quadro 9. Produção acumulada média de C-CO₂, de acordo com o solo, a camada amostrada e a localização da amostra na coluna de solo (S: anel superior, I: anel inferior), após quatro lixiviações com soro de leite

Determinação	LVAd				CYbd			
	0–20 cm		20–40 cm		0–20 cm		20–40 cm	
	S	I	S	I	S	I	S	I
C-CO ₂ (g kg ⁻¹)	3,60	0,78	4,36	0,73	1,90	0,73	2,72	0,79

Quadro 10. Contrastes ortogonais médios (C) da produção acumulada média de C-CO₂, de acordo com o solo, a camada amostrada e a localização da amostra na coluna de solo (S: anel superior, I: anel inferior), após quatro lixiviações com soro de leite^{1/}

Determinação	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C-CO ₂ (g kg ⁻¹)	0,83*	-0,36	-0,44	2,82*	3,64*	1,17*	1,93*

^{1/} C1: LVA4d vs CYbd. C2: camada 0–20 cm vs camada 20–40 cm d/LVAd. C3: camada 0–20 cm vs camada 20–40 cm d/CYbd. C4: localização do anel d/camada 0–20 cm d/LVAd. C5: Localização do anel d/camada 20–40 cm d/LVAd. C6: localização do anel d/camada 0–20 cm d/CYbd. C7: localização do anel d/camada 20–40 cm d/CYbd.

* Significativo a 5 % pelo teste F.

Considerando a localização do anel na coluna de solo, os valores mais elevados de C-CO₂ determinados no anel superior (Quadros 9 e 10) estão coerentes com o maior conteúdo de N, K, Ca e P nessas amostras (Figuras 4, 6, 7 e 8). Essa diferença fica mais evidenciada na observação da taxa acumulada de C-CO₂ mineralizável, mostrada na figura 9. As curvas determinadas para a produção de CO₂ nos materiais retirados do anel superior corroboram a maior atividade biológica apontada.

Na mesma Figura 9, destaca-se também a diferença entre os dois solos em análise. Pelos dados apresentados nos Quadros 4 e 5, conclui-se que o N total foi fator determinante nessa resposta. No entanto, considerando que a determinação exige ambiente aeróbio, o CYbd, com elevada proporção de silte (Quadro 2), mostrou eventuais problemas de aeração em resposta à menor macroporosidade apresentada por solos com essas características. Teores de silte são normalmente mais elevados nos solos de terraço, com reflexos no estabelecimento de ambientes com maior anaerobiose.

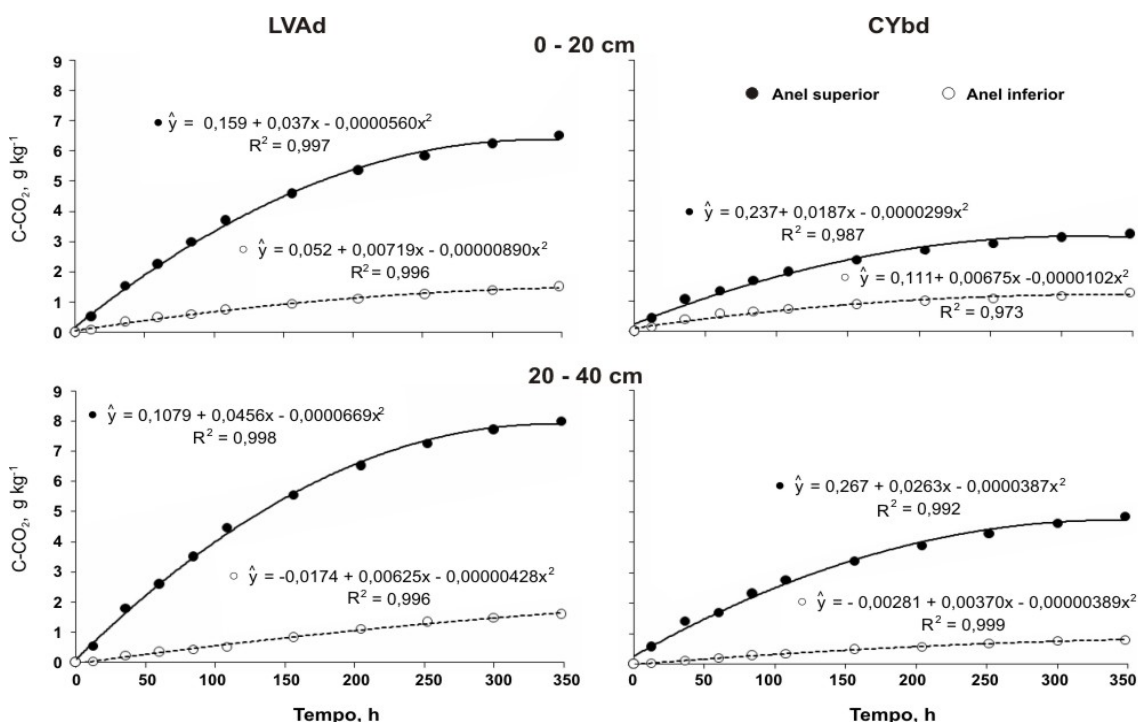


Figura 9. Produção acumulada de C-CO₂ no anel superior e inferior da coluna de solo, após quatro lixiviações com soro de leite, de acordo com o solo e a camada amostrada. Todos os coeficientes das equações de regressão foram significativos a 1 % pelo teste t.

Pelas equações ajustadas (Figura 9), ao final do tempo de incubação, foram produzidas as seguintes quantidades de C-CO₂: 7,72; 9,51; 4,34; e 5,54 g kg⁻¹ no LVAd (0–20), LVAd (20–40), CYbd (0–20) e CYbd (20–40), respectivamente. Os valores obtidos no ensaio, embora menores para o CYbd, foram satisfatórios e indicaram que a concentração relativamente elevada de eletrólitos (Quadro 4 e Figura 5) não prejudicou a atividade dos organismos no solo.

4.3. Caracterização dos Percolados

Foram analisados somente os dois primeiros percolados, recolhidos após 24 h da aplicação do soro, devido à dificuldade na lixiviação como indicado. Inclusive, na quarta aplicação do soro, algumas colunas receberam volumes inferiores ao proposto, em função do decréscimo da infiltração (Quadro 11). Esse inconveniente pode ser atribuído, fundamentalmente, ao acúmulo de óleos e graxas, associado ao excesso de carga orgânica aplicada.

A matéria orgânica fornecida pelo soro de leite foi quantificada pela DQO e pela DBO (Quadro 3). As concentrações encontradas para essas características, quando comparadas com as de outras águas residuárias, são elevadas. Os esgotos domésticos, por exemplo, têm em média valores de 350 e 600 mg L⁻¹ de DBO e DQO, respectivamente (Von Sperling, 2005). Na água residuária da indústria de fecularia, Mélo et al. (2005) encontraram valores de 8 844 e 16 020 mg L⁻¹ de DBO e DQO, respectivamente. Assim, a aplicação de 0,2 volume de poros de soro de leite pode ter provocado sobrecarga orgânica e selamento superficial por ter sido realizada em reduzido intervalo de tempo (6 d entre aplicações), levando a decréscimo da condutividade hidráulica e conseqüente decréscimo do volume lixiviado (Quadro 11). Esse fato indica que, embora tenha ocorrido aumento na atividade microbiana, seria necessário um manejo do soro de leite mais adequado, ou seja, diluição das lâminas de soro aplicadas e maior intervalo de tempo entre aplicações, o que diminuiria o acúmulo de materiais em suspensão e gordura, principalmente na parte superior da coluna.

Watson et al. (1977) constataram aumento de até quatro vezes na taxa de infiltração em um solo não-sódico, aproximadamente três meses após aplicação superficial de soro. Em outros estudos, a condutividade hidráulica do solo diminuiu drasticamente após a aplicação de soro de leite, mas atingiu valores mais elevados que os originais entre uma e três semanas do início do ensaio (McAuliffe et al., 1982; Watson et al., 1977). Dessa forma, testes em campo seriam satisfatórios para comprovar que maiores intervalos entre aplicações e, ou, a diluição do soro, desde que economicamente viáveis, poderiam aumentar o volume de lixiviado recolhido, amenizando, portanto, problemas relacionados à baixa condutividade hidráulica.

Quadro 11. Volume do lixiviado após 24 e 120 h de aplicação de 0,2 volume de poros de soro, de acordo com o solo e a camada amostrada. Valores entre parênteses indicam proporção do volume lixiviado com relação ao volume aplicado em cada lixiviação

Volume	LVAd		CYbd	
	0–20 cm	20–40 cm	0–20 cm	20–40 cm
	mL			
Aplicado	296	312	305	315
	Primeira lixiviação			
Lixiviado 0–24 h	235 (0,794)	243 (0,778)	241 (0,790)	231 (0,733)
Lixiviado 24-120 h	20 (0,068)	35 (0,112)	28 (0,092)	55 (0,175)
Lixiviado total	255 (0,862)	278 (0,890)	269 (0,882)	286 (0,908)
	Segunda lixiviação^{1/}			
Lixiviado 0–24 h	215 (0,727)	178 (0,571)	186 (0,610)	232 (0,737)
Lixiviado 24-120 h	23 (0,078)	19 (0,061)	20 (0,066)	31 (0,098)
Lixiviado total	238 (0,805)	197 (0,631)	206 (0,675)	263 (0,835)
	Terceira lixiviação^{1/}			
Lixiviado 0–24 h	78 (0,264)	105 (0,337)	180 (0,590)	188 (0,597)
Lixiviado 24-120 h	29 (0,098)	28 (0,090)	25 (0,082)	27 (0,086)
Lixiviado total	107 (0,362)	133 (0,426)	205 (0,672)	215 (0,683)
	Quarta lixiviação^{1, 2/}			
Lixiviado 0–24 h	46 (<0,156)	100 (<0,321)	142 (<0,466)	133 (<0,422)
Lixiviado 24-120 h	37 (<0,125)	44 (<0,141)	32 (<0,105)	29 (<0,092)
Lixiviado total	83 (<0,281)	144 (<0,462)	174 (<0,570)	162 (<0,514)

^{1/}Intervalo entre lixiviações: 144 h. ^{2/}Algumas colunas, nesta lixiviação, receberam volumes inferiores ao indicado, devido ao decréscimo da infiltração.

As determinações realizadas nos percolados compreenderam pH, CE, DQO e quantidades de N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, K, Na, Ca e Mg (Quadro 12). Esses valores foram analisados estatisticamente, por meio de contrastes que compararam solos, camadas amostradas e lixiviações (Quadro 13). Os valores diferentes de sete, para o pH, e de zero, nas outras determinações (Quadro 12), indicam que houve, em todos os casos, lixiviação de solutos aportados pelo soro ou deslocados do complexo de troca do solo.

Na comparação entre solos, camadas e lixiviados, quando significativos, os contrastes mostraram perdas maiores de solutos no CYbt e na camada de 0–20 cm, em relação às amostras retiradas a 20–40 cm (Quadro 13). Nos lixiviados, houve decréscimo do pH e incremento na perda de solutos na segunda lixiviação, comparada à primeira (Quadro 13). Valores relativamente elevados, mas não significativos, podem ser atribuídos à elevada variabilidade nas determinações. Neste ensaio, apesar da utilização de cinco repetições, número maior seria desejável.

Quadro 12. pH, condutividade elétrica (CE), demanda química de oxigênio (DQO) e quantidade de N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, K, Na, Ca e Mg no efluente recolhido em 24 h nas duas primeiras lixiviações (L), de acordo com o solo e a camada amostrada

Determinação	LVAd				CYbd			
	0–20 cm		20–40 cm		0–20 cm		20–40 cm	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
pH	5,38	4,83	5,73	6,24	6,89	5,31	6,90	5,99
CE (dS m ⁻¹)	0,87	1,57	0,17	0,22	1,22	2,47	0,18	0,34
DQO (mg L ⁻¹)	1830	3982	233	693	2794	4660	152	1187
N Total (mg/coluna)	11,62	17,56	3,23	6,16	11,99	15,57	2,02	2,44
N-NH ₄ ⁺ (mg/coluna)	9,24	13,05	2,96	2,46	10,14	10,93	1,50	1,25
N-NO ₃ ⁻ (mg/coluna)	1,13	1,34	1,45	2,27	1,89	1,33	1,51	1,30
K (mg/coluna)	6,05	6,82	0,94	0,91	9,48	10,33	4,34	7,11
Na (mg/coluna)	3,39	1,68	0,63	0,82	2,30	3,31	1,07	2,02
Ca (mg/coluna)	17,40	28,19	2,42	2,77	24,73	66,82	3,05	5,57
Mg (mg/coluna)	8,66	14,36	0,81	0,60	12,97	11,52	1,19	2,58

Quadro 13. Contrastes ortogonais médios (C) do pH, da condutividade elétrica (CE), da demanda química de oxigênio (DQO) e da quantidade de N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, K, Na, Ca e Mg no efluente recolhido em 24 h nas duas primeiras lixiviações, de acordo com o solo e a camada amostrada^{1/}

Determinação	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
pH	-0,73*	-0,88*	-0,345	0,55	-0,51	1,58*	0,90
CE (dS m ⁻¹)	-0,35*	1,03*	1,58*	-0,69*	-0,050	-1,26*	-0,16
DQO (mg L ⁻¹)	-514	2442*	3058*	-2152*	-460	1865	1035
N total (mg/coluna)	1,64	9,89*	11,55*	-5,95*	-2,93	-3,58*	-0,41
N-NH ₄ ⁺ (mg/coluna)	0,97	8,43*	9,16*	-3,81*	0,51	-0,78	0,25
N-NO ₃ ⁻ (mg/coluna)	0,036	-0,62	0,20	-0,20	-0,82	0,56	0,21
K (mg/coluna)	VNH ^{2/}	5,51*	4,18*	-0,77	0,03	-0,85	-2,76
Na (mg/coluna)	-0,54	1,81*	1,26	1,70	-0,19	-1,01	-0,95
Ca (mg/coluna)	-12,35*	20,20*	41,47*	-10,79*	-0,35	-42,09*	-2,52
Mg (mg/coluna)	VNH ^{2/}	10,81*	10,36*	-5,70*	0,21	1,45	-1,39

^{1/} C1: LVAd vs CYbd. C2: Camada 0–20 cm vs Camada 20–40 cm d/LVAd. C3: Camada 0–20 cm vs Camada 20–40 cm d/CYbd. C4: Compara lixiviados 1 e 2 d/camada 0–20 cm d/LVAd. C5: Compara lixiviados 1 e 2 d/camada 20–40 cm d/LVAd. C6: Compara lixiviados 1 e 2 d/camada 0–20 cm d/CYbd. C7: Compara lixiviados 1 e 2 d/camada 20–40 cm d/CYbd.. ^{2/} VNH: Variâncias não homogêneas

* Significativo a 5 % pelo teste F.

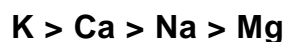
No quadro 14 são mostradas as relações entre N total, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻, determinadas para cada solo, profundidade de amostragem e lixiviação. Nesse quadro, observa-se que, independentemente do tratamento, a soma de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ é praticamente igual à concentração do N total, revelando que o nitrogênio orgânico foi quase que totalmente degradado. Eventuais diferenças devem ser atribuídas ao método de determinação. Assim, outros compostos nitrogenados praticamente não foram perdidos por lixiviação nas colunas. Na comparação entre camadas, sempre a superficial teve as maiores perdas de N. Essa perda de N nas suas formas mais solúveis deve ser levada em consideração na aplicação do soro de leite, devido ao potencial poluidor do resíduo em estudo.

Quadro 14. Relação N total:N-NH₄⁺:N-NO₃⁻ no efluente recolhido em 24 h nas duas primeiras lixiviações, de acordo com o solo e a camada amostrada

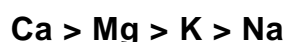
Lixiviação	LVAd		CYbd	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Primeira	10,3 : 8,2 : 1	2,3 : 2,0 : 1	6,3 : 5,7 : 1	1,3 : 0,99 : 1
Segunda	13,1 : 9,7 : 1	2,7 : 1,1 : 1	11,7 : 8,2 : 1	1,9 : 0,96 : 1

Para comparar a quantidade de K, Na, Ca e Mg lixiviada, os valores apresentados no quadro 12 foram transformados para mmol_c, e as concentrações foram calculadas dividindo-se as quantidades pelo volume lixiviado (Quadro 11). Os resultados, juntamente com os da caracterização do soro de leite (Quadro 3), todos expressos em mmol_c L⁻¹, são apresentados no quadro 15.

Na caracterização do soro de leite, a sequência de concentrações é:



No conjunto dos lixiviados, encontrou-se:



Existem duas alterações nesta sequência quando se trocam Na e K de posição, mas sem alterar sensivelmente a tendência geral, ou seja, Ca > Mg e K > Na.

Analisando as Figuras 7 e 8, que mostram a distribuição de K, Na, Ca e Mg nas colunas de solo, observa-se tendência diferenciada na distribuição desses cátions, com maior concentração em superfície para K e Na. O Ca mostra pouca alteração em profundidade no LVAd, mesmo considerando que o resíduo acrescentado é rico em Ca. Já no CYbd há clara tendência de perda por lixiviação. O mesmo pode ser indicado para o Mg.

Da comparação entre os valores do quadro 15 e das figuras 7 e 8, conclui-se que o K, em maior concentração no soro, porém com maior

interação com as partículas do solo, foi proporcionalmente menos lixiviado que o Na, encontrado em baixíssima disponibilidade nos solos e camadas em estudo (Quadro 2). Os dois cátions monovalentes contribuem para o deslocamento de Ca e Mg – este último em maior proporção, por apresentar menor concentração no soro aplicado e menor interação com o complexo de troca catiônica do solo.

Quadro 15. Concentração de K, Na, Ca e Mg no soro de leite e no efluente recolhido em 24 h nas duas primeiras lixiviações, de acordo com o solo e a camada amostrada

Material	K	Na	Ca	Mg	K : Na : Ca : Mg
	mmol _c L ⁻¹				
Soro de Leite	42,462	19,826	27,750	6,250	6,79 : 3,17 : 4,44 : 1
Primeira lixiviação					
LVA _d (0–20 cm)	0,660	0,627	3,702	3,071	0,21 : 0,20 : 1,21 : 1
LVA _d (20–40 cm)	0,099	0,113	0,498	0,278	0,36 : 0,41 : 1,79 : 1
CY _{bd} (0–20 cm)	1,009	0,415	5,131	4,485	0,22 : 0,09 : 1,14 : 1
CY _{bd} (20–40 cm)	0,482	0,201	0,660	0,429	1,12 : 0,47 : 1,54 : 1
Segunda lixiviação					
LVA _d (0–20 cm)	0,813	0,340	6,556	5,566	0,15 : 0,06 : 1,18 : 1
LVA _d (20–40 cm)	0,131	0,200	0,778	0,281	0,47 : 0,71 : 2,77 : 1
CY _{bd} (0–20 cm)	1,424	0,774	17,962	5,161	0,28 : 0,15 : 3,48 : 1
CY _{bd} (20–40 cm)	0,786	0,379	1,200	0,927	0,85 : 0,41 ; 1,30 : 1

5. CONCLUSÕES

Os resultados observados neste trabalho permitem concluir que:

1. A aplicação de soro de leite no solo como destino final para esse resíduo é uma alternativa viável do ponto de vista ambiental, desde que seja feito um correto manejo, a fim de evitar problemas de selamento superficial, salinização e lixiviação de elementos indesejáveis.
2. As elevadas concentrações eletrolíticas do soro de leite provocaram aumento generalizado da CE nos solos estudados, sugerindo tendência à salinização.
3. Houve incremento maior no teor de nitrogênio assimilável (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) no solo em decorrência dos processos de mineralização da matéria orgânica e da maior concentração dessas formas em relação ao N total no soro de leite incorporado.
4. A relação Na : Mg de 3,14 : 1 no soro de leite reforça a necessidade de disposição criteriosa desse efluente no solo. As relações Na : Mg foram mais elevadas nas camadas mais profundas dos dois solos, indicando maior suscetibilidade à sodificação em amostras com menor teor de matéria orgânica.

5. O decréscimo do pH nos solos estudados pode ter solubilizado o Al, principalmente nas camadas de 20–40 cm. Entretanto, os teores elevados de Al trocáveis no solo podem ser decorrentes da interferência significativa de íons trocáveis, como H^+ e outros de caráter ácido, nas determinações.
6. Elevadas concentrações de K, Na e Ca provocaram deslocamento de Mg do complexo de troca e acentuada lixiviação desse nutriente.

REFERÊNCIAS

- ALLISON, F.E. Soil aggregation-some facts and fallacies as seen by a microbiologist. *Soil Sci.* 106:136-143, 1968.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 25:27-33, 2000 (Boletim Informativo)
- ALVAREZ V., V.H. & ALVAREZ, G.A.M. Comparação de médias ou teste de hipóteses? *Contrastes! Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 31:24-34, 2006 (Boletim Informativo)
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19.ed. Washington, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 1995. s.p.
- ARAÚJO, E.H. Redução na poluição dos laticínios pela transformação da lactose do soro de queijo em etanol. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 39., Porto Alegre, 2001. Anais. Porto Alegre, Associação Brasileira de Educação em Engenharia, 2001. p.1-6.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. A qualidade de água na agricultura. 2.ed. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1999. 153p.
- BERTOL, T.M.; GOMES, J.D.F. & SILVA, E.D. Soro de leite integral na alimentação de suínos em crescimento e terminação. *R. Soc. Bras. Zootec.*, 22:993-1002, 1993.

- BOUWER, H. & CHANEY, R.L. Land treatment of wastewater. R. Adv. Agron., 26:136–176, 1974.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica do fósforo em extratos de solos e plantas. R. Ceres, 21:73-85, 1974.
- BRANDÃO, S.C.C. Soro: Um desafio para as fábricas de queijo. R. Leite e Deriv., 15:13-19, 1994.
- CURL, E.A. & RODRIGUEZ-KABANA, R. Microbial interactions. In: WILKINSON, R.E., ed. Research methods in weed science. Atlanta, Southern Weed Science Society, 1972. p.162-194.
- DAL BOSCO, T.; IOST, C.; SILVA, L.N.; CARNELLOSI, C.F.; EBERT, D.C.; SCHREINER, J.S.; SAMPAIO, S.C. Utilização de água residuária de suinocultura em propriedade agrícola: estudo de caso. Irriga, 13:139-144, 2008.
- DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. 2.ed. Viçosa, Editora UFV, 1997. 26p. (Boletim de Extensão, 29)
- FAO & WHO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS & WORLD HEALTH ORGANIZATION. Standard for whey powders - CODEX STAN 289. Genebra, Codex Alimentarius Commission, 1995. p.1-3.
- FARRO, A.P.C. & VIOTTO, L. A. Redução do teor de gordura do soro de queijo pré-tratado por microfiltração. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE CIÊNCIA Y TECNOLOGIA DE MEMBRANAS, 4., 2003. Anais. Florianópolis, CITEM, 2003. CD-ROM.
- FIORETTO, R. A. Uso direto da manipueira em fertirrigação. In: Resíduos da industrialização de mandioca no Brasil. São Paulo, Paulicéia, 1994.. p. 51-80.
- GHERI, E.O.; FERREIRA, M.E. & CRUZ, M.C.P. Resposta do capim-tanzânia à aplicação de soro ácido de leite. Pesq. Agrop. Bras., 38:753-760, 2003.
- GARCIA, G. O. Alterações químicas, físicas e mobilidade de íons no solo decorrentes da aplicação de água residuária da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro conilon. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2003. 100p. (Dissertação de Mestrado)
- HARDAN, A. & AL-ANI, A.N. Improvement of soil structure by using date and sugar beet waste products. In: EMERSON, W.W.; BOND, R.D. & DEXTER, A.R. Ed. *Modification of Soil Structure*. New York, John Wiley & Sons, 1978. 435p.

- ROBBINS, C.W. & LEHRSCHE, G.A. Cheese whey as a soil conditioner. In: WALLACE, A. & TERRY, R., Ed. Handbook of soil conditioners: Substances that enhance the physical properties of soil. 1.ed. New York, Marcel Dekker, INC, 1998. p.167-185.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção da Pecuária municipal. 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 20 jun. 2008.
- INDI - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE MINAS GERAIS. A indústria de laticínios brasileira e mineira em números. 2003. Disponível em: <<http://www.indi.mg.gov.br>>. Acesso em 20 jun. 2008.
- JONES, S.B., HANSEN, C.L. & ROBBINS, C.W. Chemical oxygen demand fate from cottage cheese (acid) whey applied to a sodic soil. Arid Soil Res. Rehab., 7:71-78,1992.
- JONES, S.B., ROBBINS, C.W. & HANSEN, C.L. Sodic soil reclamation using cottage cheese (acid) whey. Arid Soil Res. Rehab., 7:51-61, 1993.
- KAMPF, N. & SCHWERTMANN, U. The 5M NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. Clays Clay Miner., 30:401-408, 1982.
- KHAMURUI, K.; PAL D. & RAJORHIA, G.S. Production of ready-to-reconstitute beverages from Cheddar cheese whey and Kinnow mandarin juice. Milk Sci. Inter., 56:541-600, 2001.
- KINSELLA, J.E. Milk proteins: Physicochemical and functional properties. Critical Rev. Food Sci. Nutr., 21:197-262, 1984.
- LEHRSCHE, G.A., ROBBINS, C.W. & HANSEN, C.L. Cottage cheese (acid) whey effects on sodic soil aggregate stability. Arid Soil Res. Rehabil., 8:19-31, 1994.
- LIZIEIRE, R.S & CAMPOS, O.F. Soro de queijo “in natura” na alimentação do gado de leite. Niterói, Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio de Janeiro e Embrapa Gado de Leite, 2001. (Instrução Técnica para o Produtor de Leite, 44)
- MACHADO, R.M.G; FREIRE, V.H.; SILVA, P.C.; FIGUEIREDO, D.V. & FERREIRA, P.E. Controle ambiental nas pequenas e médias indústrias de laticínios. Belo Horizonte, Segrac, 2002. 224p.
- MAGANHA, M.F.B. Guia técnico ambiental da indústria de produtos lácteos Série P + L. São Paulo, CETESB, 2006. 89p.

- MARTINS, S.D.; Guyomar, P.P.; RIBEIRO, E.R. & XAVIER, A.M.F. Tratamento Anaeróbio em duas etapas do soro de queijo empregando-se duas configurações de reatores UASB. In: Oficina e Seminário Latino-Americano de Digestão Anaeróbia, 6., Recife, 2001. Anais. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2000. p.9-12.
- MATOS, A.T. Disposição de águas residuárias no solo. Viçosa, MG, Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/Universidade Federal de Viçosa, 2004. 144 p. (Série Caderno Didático).
- MATOS, A.T. Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos. Viçosa, MG, Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/Universidade Federal de Viçosa, 2006. 120 p. (Série Caderno Didático).
- MARTINS, S.D.; Guyomar, P.P.; RIBEIRO, E.R. & XAVIER, A.M.F. Tratamento Anaeróbio em duas etapas do soro de queijo empregando-se duas configurações de reatores UASB. In: Oficina e Seminário Latino-Americano de Digestão Anaeróbia, 6., Recife, 2001. Anais. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2000. p.9-12.
- McAULIFFE, K.W., SCOTTER, D.R., MacGREGOR, A.N., & EARL, K.D. Casein whey wastewater effects on soil permeability. J. Environ. Qual., 11:31-34, 1982.
- MÉLO, R.F.; FERREIRA, P.A.; RUIZ, H.A.; MATOS, A.T. & OLIVEIRA, L.B. Alterações físicas e químicas em três solos tratados com água residuária de mandioca. Irriga, 10:383-392, 2005.
- MÉLO, R. F. Avaliação das alterações físicas e químicas, distribuição e mobilidade dos íons em três solos tratados com manipueira. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2004. 59p. (Dissertação de Mestrado)
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO Instrução Normativa DILEI I/85. Requisitos para obtenção e industrialização de soro de leite, Divisão de Inspeção de leite e derivados. Brasília, 04 de novembro de 1985.
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa 16, de 23 de agosto de 2005. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade e Identidade da Bebida Láctea. Brasília, 24 de agosto de 2005.
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Sumário Executivo- Complexo Leite. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 15 jul. 2009a.

- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Sistemas de Informações Gerenciais do Serviço de Inspeção Federal (SIGSIF). Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 07 jul. 2009b.
- MODLER, H. W. The use of whey as animal feed and fertilizer. Bull. Inter. Dairy Fed., 212:111-124, 1987.
- NORRISH, K. & TAYLOR, R.M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. J. Soil Sci., 12:294-306, 1961.
- OLIVEIRA, E.M.M.; RUIZ, H.A.; FERREIRA, P.A.; ALVAREZ V., V.H. & BORGES JÚNIOR, J.C. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de fosfato, potássio e amônio em solos de Minas Gerais. R. Bras. Eng. Agr. Amb., 8:196-203, 2004.
- PASSOS, R.R.; RUIZ, H.A.; MENDONÇA, E.S.; CANTARUTTI, R.B. & SOUZA, A.P. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. R. Bras. Ci. Solo, 31:1119-1129, 2007.
- PIZARRO, F. Riegos localizados de alta frecuencia. 2.ed. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1990. 471p.
- PRIMO, W.M. Restrições ao desenvolvimento da indústria brasileira de laticínios. In: VILELA, D., BRESSAN, M. & CUNHA, A.S. eds. Cadeia de Lácteos no Brasil: restrições ao seu desenvolvimento. Brasília, MCT/CNPq, Juiz de Fora, Embrapa Gado de Leite, 2001. P.73-129.
- RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington DC, U.S. Department of Agriculture, 1954. 160 p. (USDA Agricultural Handbook, 60).
- ROBBINS, C.W. & LEHRSCHE, G.A. Effects of acidic cottage cheese whey on chemical and physical properties of a sodic soil. Arid Soil Res. Rehabil., 6:127-134, 1992.
- ROBBINS, C.W. & LEHRSCHE, G.A. Cheese whey as a soil conditioner. In: WALLACE, A. & TERRY, R., Ed. Handbook of soil conditioners: Substances that enhance the physical properties of soil. 1.ed. New York, Marcel Dekker, INC, 1998. p.167-185.
- RUIZ, H.A. Métodos de análises físicas do solo. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2004. 22p. (Notas de aula)
- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). R. Bras. Ci. Solo, 29:297-300, 2005.

- RUIZ, H.A.; FERREIRA, G.B. & PEREIRA, J.B.M. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. R. Bras. Ci. Solo, 27:389-393, 2003.
- RUIZ, H.A.; GHEYIL, H.R.; ALMEIDA, M.T.; RIBEIRO, A.C. Torta de filtro e vinhaça na recuperação de um solo salino-sódico e no desenvolvimento de arroz irrigado. R. Bras. Ci. Solo, 21: 659-665, 1997.
- SANTOS, J.P.V. & FERREIRA, C.L.L.F. Alternativas para o aproveitamento de soro de queijo nos pequenos e médios laticínios. R. Inst. Lat. Cândido Tostes., 56:44-50, 2001.
- SILVA, D.J.P. Diagnóstico do consumo de água e da geração de efluentes em uma indústria de laticínios e desenvolvimento de um sistema multimídia de apoio. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2006. 88p. (Dissertação de Mestrado)
- TEDESCO, M.J., GIANELLO, C., BISSANI, C.A., BOHEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análises de solos, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5)
- VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7)
- Von SPERLING, M. Introdução á qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3.ed. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005. 452p.
- WATSON, K.S., PETERSON, A.E. & POWELL, R.D. Benefits of spreading whey on agricultural land. J. Water Pollut. Control Fed., 49:24-34, 1977.
- ZOCCAL, R. & FONSECA, R.A. Importações e exportações de produtos lácteos no ano de 2008. Disponível em: <[HTTP://cileite.com.br/panorama/balanco26.html](http://cileite.com.br/panorama/balanco26.html)>. Acesso em 16 julh. 2009.

APÊNDICE

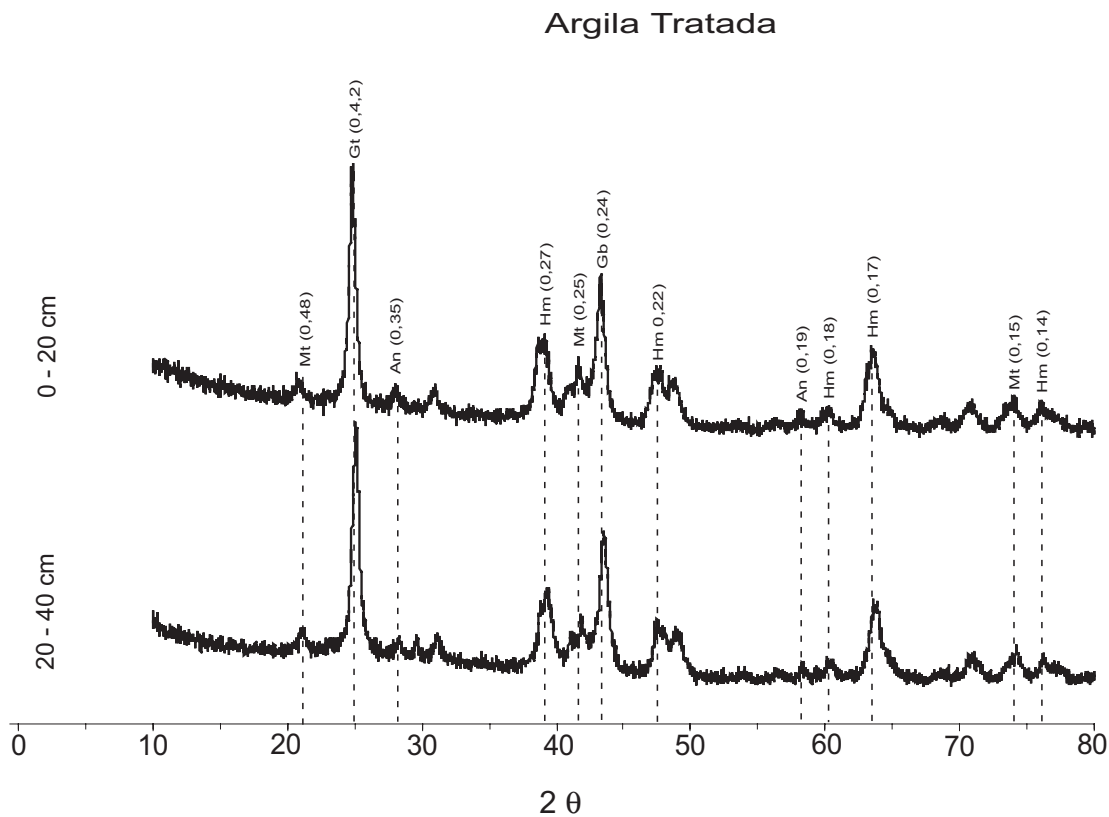
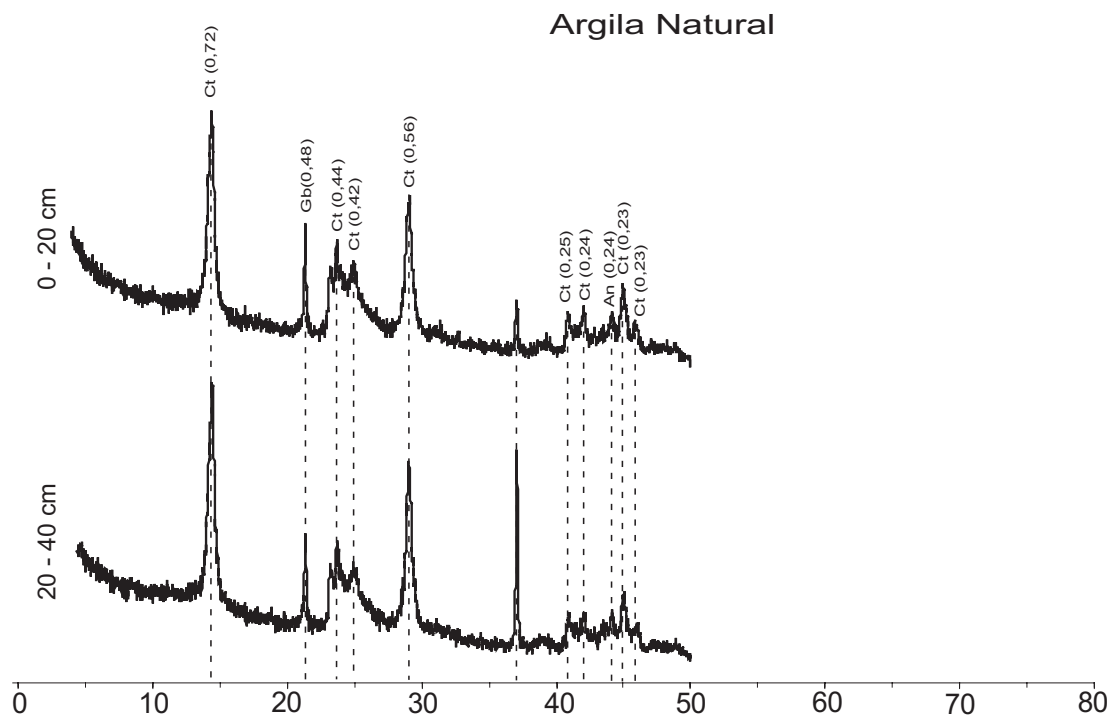


Figura 1A. Difratoigramas de raios X da argila natural e da argila tratada com NaOH (5 mol L^{-1}) do LVAd (0–20 e 20–40 cm). Ct: caulinita; Gt: goethita, Gb: gibbsita; Hm: hematita; An: anatásio; Mt: magnetita.

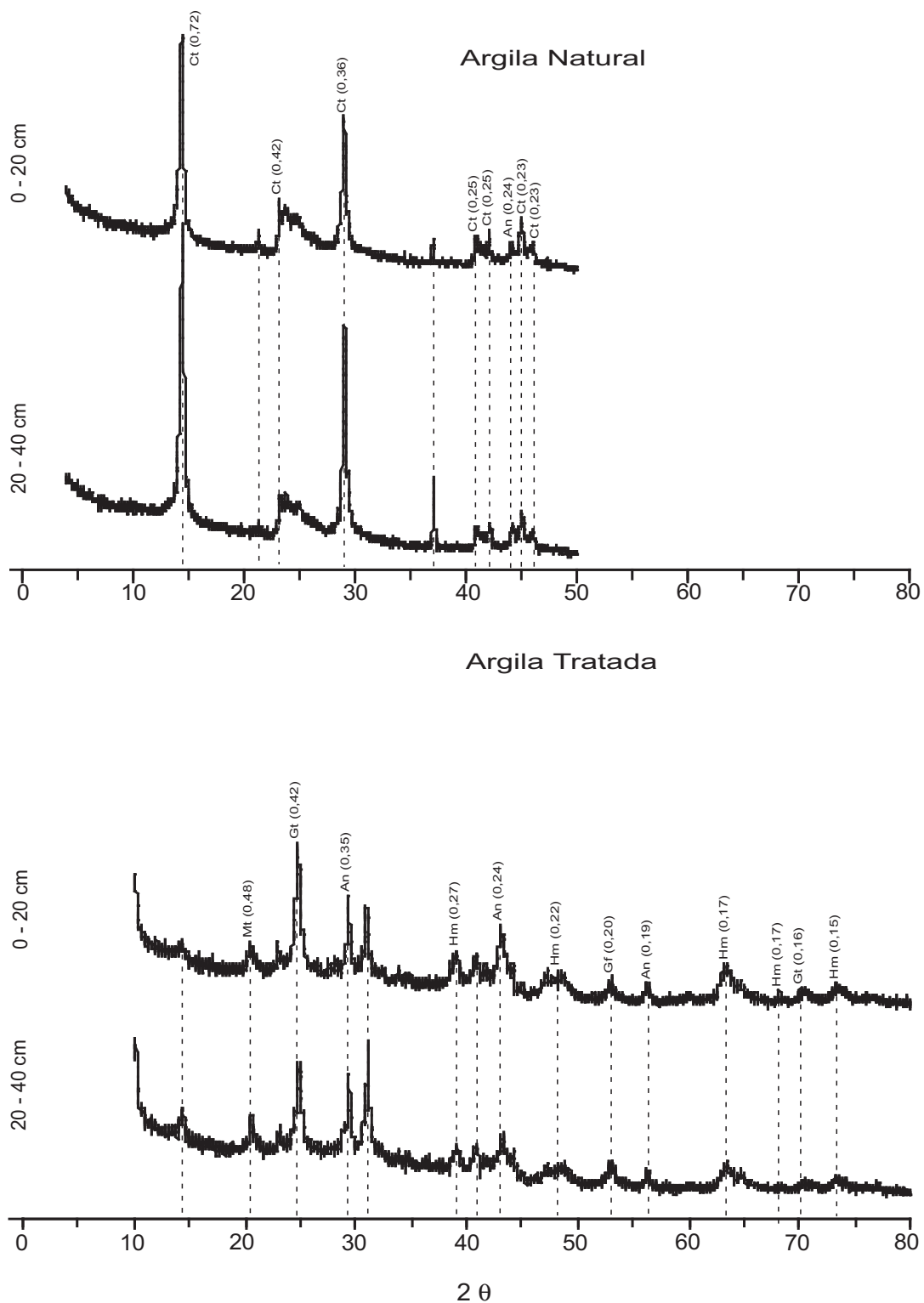


Figura 2A. Difratoigramas de raios X da argila natural e da argila tratada com NaOH (5 mol L^{-1}) do CYbd (0–20 e 20–40 cm). Ct: caulinita; Gt: goethita; Gb: gibbsita; Hm: hematita; An: anatásio; Mt: magnetita; Gt: grafita.

Quadro 1A. Análise de variância do pH, da condutividade elétrica (1:5) (CE), do N total, do N-NH₄⁺ e do N-NO₃⁻, de acordo com o solo, a camada amostrada (P1: 0–20 cm, P2: 20–40 cm) e os anéis na coluna de solo

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio				
		pH	CE	N total	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
Blocos	4	0,103	49 818	95 957*	3 856*	4 893*
Solos	1	3,068*	504 164*	10 449 760*	53 926*	4 875
Profundidades d/LVAd	1	3,512*	2 313	9 827 420*	12 071*	2 327
Profundidades d/CYbd	1	12,90*	77	22 131 520*	72 847*	395
Anéis d/P1 d/LVAd	8	0,119	369 209*	871 645*	26 536*	2 120
Anéis d/P2 d/LVAd	8	0,214	596 670*	1 034 012*	25 457*	2 217
Anéis d/P1 d/CYbd	8	0,381*	119 262*	407 039*	6 657*	1 324
Anéis d/P2 d/CYbd	8	0,889*	357 779*	471 745*	6 634*	630
Resíduo	140	0,127	25 889	39 569	848	1 531
CV (%)		7,63	24,16	13,95	26,15	61,31

* Significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 2A. Análise de variância do K e Na disponíveis e do Ca, Mg e Al trocáveis, de acordo com o solo, a camada amostrada (P1: 0–20 cm, P2: 20–40 cm) e os anéis na coluna de solo

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio				
		K	Na	Ca	Mg	Al
Blocos	4	249542*	1863	0,692*	0,169*	8,335*
Solos	1	66470	2351	19,576*	2,835*	35,262*
Profundidades d/LVAd	1	11	7872	16,120*	5,407*	51,725*
Profundidades d/CYbd	1	2190	63	47,248*	6,152*	91,042*
Anéis d/P1 d/LVAd	8	1119669*	30527*	0,071	0,152*	3,696
Anéis d/P2 d/LVAd	8	1401223*	43681*	1,332*	0,039*	3,759
Anéis d/P1 d/CYbd	8	580422*	13208*	0,678*	0,430*	0,661
Anéis d/P2 d/CYbd	8	754510*	8311*	0,145*	0,128*	15,794*
Resíduo	140	54598	2587	0,102	0,019	3,143
CV (%)		39,84	34,23	17,99	20,19	63,66

* Significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 3A. Análise de variância do P disponível, de acordo com a camada amostrada (P1: 0–20 cm, P2: 20–40 cm) e os anéis na coluna de solo, para cada solo em estudo

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	
		LVAd	CYbd
Blocos	4	53,31	288,40
Profundidades	1	75,99	0,68
Anéis d/P1	8	296,43*	2830,76*
Anéis d/P2	8	1214,56*	4631,72*
Resíduo	68	39,18	317,68
CV (%)		80,12	91,65

* Significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 4A. Análise de variância da produção acumulada média de C-CO₂, de acordo com o solo, a camada amostrada (P1: 0–20 cm, P2: 20–40 cm), a localização da amostra na coluna de solo (S: anel superior, I: anel inferior) e o tempo de incubação

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio
Blocos	4	41,772*
Solos	1	84,683*
Profundidades d/LVAd	1	3,412
Profundidades d/CYbd	1	3,185
Anéis d/P1 d/LVAd	1	218,739*
Anéis d/P2 d/LVAd	1	321,171*
Anéis d/P1 d/CYbd	1	37,472*
Anéis d/P2 d/CYbd	1	148,299*
Tempos d/S d/P1 d/LVAd	10	26,705*
Tempos d/I d/P1 d/LVAd	10	1,324
Tempos d/S d/P2 d/LVAd	10	41,238*
Tempos d/I d/P2 d/LVAd	10	1,682
Tempos d/S d/P1 d/CYbd	10	6,019*
Tempos d/I d/P1 d/CYbd	10	0,884
Tempos d/S d/P2 d/CYbd	10	13,786*
Tempos d/I d/P2 d/CYbd	10	0,422
Resíduo	348	2,816
CV (%)		89,59

* Significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 5A. Análise de variância do pH, da condutividade elétrica (CE) e da demanda química de oxigênio (DQO) no efluente recolhido em 24 h nas duas primeiras lixiviações, de acordo com o solo, a camada amostrada (P1: 0–20 cm, P2: 20–40 cm) e a lixiviação analisada

Fonte de Variação	pH		CE		DQO	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Blocos	4	1,39	4	0,04	4	2294160
Solos	1	5,32*	1	1,05*	1	2300355
Profundidades d/LVAd	1	3,86*	1	4,67*	1	29825960*
Profundidades d/CYbd	1	0,59	1	11,62*	1	40428640*
Lixiviação d/P1 d/LVAd	1	0,76	1	0,61*	1	11576310*
Lixiviação d/P2 d/LVAd	1	0,64	1	0,007	1	528919
Lixiviação d/P1 d/CYbd	1	6,20*	1	3,94*	1	4884109
Lixiviação d/P2 d/CYbd	1	2,03	1	0,06	1	2678757
Resíduo	28	0,65	25	0,03	27	1881473
CV (%)		13,65		19,65		73,29

* Significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 6A. Análise de variância da quantidade de N total, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ no efluente recolhido em 24 h nas duas primeiras lixiviações, de acordo com o solo, a camada amostrada (P1: 0–20 cm, P2: 20–40 cm) e a lixiviação analisada

Fonte de Variação	N-Total		N-NH ₄ ⁺		N-NO ₃ ⁻	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Blocos	4	16,780	4	3,111	4	0,447
Solos	1	26,889	1	7,812	1	0,008
Profundidades d/LVAd	1	489,476*	1	355,612*	1	1,378
Profundidades d/CYbd	1	666,588*	1	394,680*	1	0,025
Lixiviação d/P1 d/LVAd	1	88,437*	1	36,247*	1	0,470
Lixiviação d/P2 d/LVAd	1	21,482	1	0,640	1	1,779
Lixiviação d/P1 d/CYbd	1	0,423	1	4,064	1	1,147
Lixiviação d/P2 d/CYbd	1	32,006*	1	0,158	1	0,002
Resíduo	28	10,419	27	2,585	22	0,768
CV (%)		36,58		25,42		56,22

* Significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 7A. Análise de variância da quantidade de Na e Ca no efluente recolhido em 24 h, de acordo com o solo, a camada amostrada (P1: 0–20 cm, P2: 20–40 cm) e a lixiviação analisada

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	
		Na	Ca
Blocos	4	1,491	104,98*
Solos	1	1,957	1484,05*
Profundidades d/LVAd	1	14,600*	166510*
Profundidades d/CYbd	1	7,980	7641,48*
Lixiviações d/P1 d/LVAd	1	0,457	291,24*
Lixiviação d/P2 d/LVAd	1	0,115	0,31
Lixiviação d/P1 d/CYbd	1	2,567	3814,39*
Lixiviação d/P2 d/CYbd	1	2,266	18,59
Resíduo	26	2,762	44,15
CV (%)		85,88	37,00

* Significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 8A. Análise de variância da quantidade de K e Mg no efluente recolhido em 24 h, de acordo com a camada amostrada (P1: 0–20 cm, P2: 20–40 cm) e a lixiviação analisada, para cada solo em estudo

Fonte de Variação	K				Mg			
	LVAd		CYbd		LVAd		CYbd	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Blocos	4	2,20	4	2,74	4	0,32	4	10,64
Profundidades	1	116,30*	1	82,23*	1	544,51*	1	519,64*
Lixiviação d/P1	1	0,34	1	1,79	1	81,37*	1	5,26
Lixiviação d/P2	1	0,000031	1	17,01	1	0,18	1	4,65
Resíduo	10	1427	11	14,03	11	1,11	11	24,29
CV (%)		32,66		47,69		16,48		67,52

* Significativo a 5 % pelo teste F.